

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

**Cámara acústica para identificación de fallas en motores eléctricos –
calibración y pruebas**

Alexander David Cisneros Cornejo

Kleber Andrés Fierro Caiza

Adela Mishell Morales Males

Dilan Matias Tituaña Pillajo

Ingeniería Mecánica

Trabajo de fin de carrera presentado como requisito
para la obtención del título de
Ingeniería Mecánica

Quito, 23 de diciembre de 2021

UNIVERSIDAD SAN FRANCISCO DE QUITO USFQ

Colegio de Ciencias e Ingenierías

HOJA DE CALIFICACIÓN DE TRABAJO DE FIN DE CARRERA

**Cámara acústica para identificación de fallas en motores eléctricos –
calibración y pruebas**

**Alexander David Cisneros Cornejo
Kleber Andrés Fierro Caiza
Adela Mishel Morales Males
Dilan Matias Tituaña Pillajo**

Nombre del profesor, Título académico

Alfredo Guillermo Valarezo, Phd y post
doctorado en Ingeniería de Ciencias

Quito, 23 de diciembre de 2021

© DERECHOS DE AUTOR

Por medio del presente documento certifico que he leído todas las Políticas y Manuales de la Universidad San Francisco de Quito USFQ, incluyendo la Política de Propiedad Intelectual USFQ, y estoy de acuerdo con su contenido, por lo que los derechos de propiedad intelectual del presente trabajo quedan sujetos a lo dispuesto en esas Políticas.

Asimismo, autorizo a la USFQ para que realice la digitalización y publicación de este trabajo en el repositorio virtual, de conformidad a lo dispuesto en la Ley Orgánica de Educación Superior del Ecuador.

Nombres y apellidos: Alexander David Cisneros Cornejo

Código: 00133554

Cédula de identidad: 1716169329

Lugar y fecha: Quito, 23 de diciembre de 2021

Nombres y apellidos: Dilan Matias Tituaña Pillajo

Código: 00200182

Cédula de identidad: 1725338949

Lugar y fecha: Quito, 23 de diciembre de 2021

Nombres y apellidos: Kleber Andrés Fierro Caiza

Código: 00123242

Cédula de identidad: 1722540158

Lugar y fecha: Quito, 23 de diciembre de 2021

Nombres y apellidos: Adela Mishell Morales Males

Código: 00131377

Cédula de identidad: 1003451133

Lugar y fecha: Quito, 23 de diciembre de 2021

ACLARACIÓN PARA PUBLICACIÓN

Nota: El presente trabajo, en su totalidad o cualquiera de sus partes, no debe ser considerado como una publicación, incluso a pesar de estar disponible sin restricciones a través de un repositorio institucional. Esta declaración se alinea con las prácticas y recomendaciones presentadas por el Committee on Publication Ethics COPE descritas por Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing, disponible en <http://bit.ly/COPETHeses>.

UNPUBLISHED DOCUMENT

Note: The following capstone project is available through Universidad San Francisco de Quito USFQ institutional repository. Nonetheless, this project – in whole or in part – should not be considered a publication. This statement follows the recommendations presented by the Committee on Publication Ethics COPE described by Barbour et al. (2017) Discussion document on best practice for issues around theses publishing available on <http://bit.ly/COPETHeses>.

RESUMEN

En la industria, por mucho tiempo se ha recurrido a la experiencia del ingeniero para identificar una máquina en buen estado de una que no lo está, y a partir de la imprecisión de este método, surgen alternativas como la cámara acústica.

El objetivo de este proyecto es presentar un prototipo de una cámara acústica funcional de bajo costo. Se plantea cuatro tipos de arreglos diferentes utilizando los 16 micrófonos condensadores Behringer ECM-8000 disponibles; los arreglos son validados por el cálculo del parámetro F y las respuestas de las simulaciones en Python. Asimismo, se diseña y evalúa mediante simulaciones en Inventor Autodesk la estructura en la que se asentarán los micrófonos; el diseño consta de dos planchas metálicas en las cuales se encuentra la distribución de los arreglos. Por otra parte, se implementa una caja de circuitos que permite estabilidad y seguridad de las placas y circuitos.

Finalmente se realizan pruebas de calibración (variando posiciones y alturas de fuentes de sonido, frecuencias de sonido, y número de fuentes) y en tres motores eléctricos modelo D0L34HS con el sistema completo utilizando el algoritmo Beamforming por medio de la interfaz LabView; se observan los resultados del análisis en una imagen del escenario estudiado con un mapa de nivel de presión sonora sobrepuesta y las respuestas de frecuencia con la finalidad de identificar la falla interna de cada motor.

Palabras clave: Cámara acústica, beamforming, matriz, frecuencia, motor eléctrico, sonido, señales, calibración.

ABSTRACT

Throughout time, an engineer's experience has always been needed in all types of industry to identify a variety of machinery to compare functional from defective ones. That is where the use of an acoustic camera is an alternative.

The purpose of this project is to present a prototype for a low-cost and functional acoustic camera. Four kinds of arrangements are made using sixteen microphones Behringer ECM-8000. These arrangements are validated by calculating the F-parameter with additional simulations in Python. Additionally, a design and simulation in Autodesk Inventor is made in order to create a metallic structure capable of holding the microphone arrangements. Furthermore, a circuit box is implemented to transfer the data from the microphones to a computer.

Finally, testing was made in three electric motors model D0L34HS using the acoustic camera with a Beamforming algorithm and analyzing in LabView. Results are then demonstrated in a clear image where levels of sound pressure and frequency as its measurements show the internal failure of each motor.

Key words: acoustic camera, beamforming, matrix, frequency, electric motor, sound, signals, calibration.

TABLA DE CONTENIDO

Resumen.....	5
Abstract.....	6
Tabla de contenido.....	7
Índice de tablas.....	9
Índice de figuras.....	11
Introducción	13
Definición del problema y especificaciones del proyecto.....	17
Requerimientos	18
Conceptos de diseño y selecciones	19
Arreglo o matriz de micrófonos	19
Estructura	27
Diagrama eléctrico power supply	29
Caja de circuitos.....	29
Manejo del proyecto	30
Estándares de ingeniería	30
Materiales y métodos	32
Métodos.....	32
Beamforming	32
Parámetro F.....	34
Selección de materiales y componentes.....	35
Estructura metálica.....	35
Caja de circuitos.....	36
Diseño para la fabricación.....	36
Proceso de fabricación	36
Experimento de ingeniería para verificación	37
Análisis de ingeniería	42
Resultados.....	47
Informe de diseño.....	47
Simulación en MDSolids	49
Simulación Inventor.....	51
Análisis de ingeniería	55
Motor nuevo.....	56
Motor dañado 1	57
Motor dañado 2	58
Motor nuevo.....	61
Motor dañado 1	61
Motor dañado 2	62
Discusión	63
Estructura	63
Arreglo de micrófonos	63
Análisis de motor	64
Seguridad a través del diseño	64
Manual de mantenimiento y operación	66

Operación.....	66
Mantenimiento	74
Conclusiones	75
Recomendaciones	75
Referencias bibliográficas	77
Anexo A: Resultados de simulaciones desplazamiento máximo.....	79
Anexo B: Propuestas de arreglos y respuesta de simulación	81
Anexo C: Análisis de deflexión	83
Anexo D: Código parámetro F.....	89
Anexo E: Simulación de deflexión en MdSolids.....	92
Anexo F: Calibración individual para cada micrófono.....	95
Anexo G: Hojas de proceso	104
Anexo H: Análisis de Riesgo	115
Anexo I: Gestión de proyectos	121
Anexo J: Planos	122

ÍNDICE DE TABLAS

Tabla 1 Ubicación de las propuestas de arreglos de micrófonos	26
Tabla 2 Ubicación y presión de las fuentes de sonido generadas en Python	32
Tabla 3 Propuestas de arreglos y su respuesta en Python	33
Tabla 4 Resultados parámetro F	35
Tabla 5 Resultados primera prueba de calibración	38
Tabla 6 Resultados segunda prueba de calibración	39
Tabla 7 Resultados tercera prueba de calibración.....	40
Tabla 8 Resultados de cuarta prueba de calibración.....	41
Tabla 9 Características de los tres motores.....	44
Tabla 10 Datos de calibración del acelerómetro.....	46
Tabla 11 Resultados de deflexión máxima en MDSolids	51
Tabla 12 Propiedades mecánicas de los materiales de la estructura	52
Tabla 13 Desplazamientos máximos de la simulación en Inventor Autodesk.....	52
Tabla 14 Resultados de ubicación de sonido para los tres motores	55
Tabla 15 Resumen resultados de deflexión	63
Tabla 16 Cantidad de componentes	67
Tabla 17 Datos análisis de deflexión	83
Tabla 18 Magnitud de fuerza correspondiente para el arreglo doble círculo	92
Tabla 19 Parámetros del micrófono condensador.....	95
Tabla 20 Datos nivel de presión acústica.....	96
Tabla 21 Posición del micrófono de prueba	96
Tabla 22 Medidas de entrada de voltaje	96
Tabla 23 Parámetros habitación con fuente (ruido blanco)	98
Tabla 24 Medidas de entrada de voltaje para segunda condición de calibración	99
Tabla 25 Datos muestreo de voltaje.....	101
Tabla 26 Resultados de calibración para cada micrófono	102
Tabla 27 Resumen análisis de riesgo	115
Tabla 28 Riesgo 001.Cantidad de micrófonos disponibles para el arreglo de la cámara acústica.....	117
Tabla 29 Riesgo 002.Consideración del peso (estructura y micrófonos) para regular la posición de la cámara acústica.....	117
Tabla 30 Riesgo 003. Fallo del software Labview por actualizaciones, no reconocimiento de subprogramas y mala conexión con los micrófonos.	117
Tabla 31 Riesgo 004. Retraso en la entrega de la estructura metálica debido a fallas de fabricación y subcontratistas.	118
Tabla 32 Riesgo 005. Precision de la fabricación de arreglos para micrófonos	118
Tabla 33 Riesgo 006. Flexión a causa del peso de micrófonos conectados	118
Tabla 34 Riesgo 007. Estabilidad de la estructura soporte de microns	119
Tabla 35 Riesgo 008. Mala sujeción de microfonos por una tolerancia incorrecta de corte en las planchas	119
Tabla 36 Riesgo 009. Falta de librería td_dir en Python, no permite que corra el programa three_sources.py y no se genere el archivo .h5	119
Tabla 37 Riesgo 010. Adaptaciones de conexiones electricas no adecuados para la camara acustica.....	120
Tabla 38 Riesgo 011. Mala consideracion de dimensiones de arreglos, sobredimensión de los arreglos.....	120

Tabla 39 Riesgo 012. Falta de instaladores en la computadora que no reconozca el DAC o la camara digital externa	120
Tabla 40 Resumen de gastos.....	121

ÍNDICE DE FIGURAS

Figura 1 Espectros de vibración de un motor a)sano y b) excentricidad y distorsión de contacto basado en la medición de vibraciones (Orman, Rzeszucinski, & Pinto, 2014)..	16
Figura 2 Espectros de vibración de un motor a)sano y b) excentricidad y distorsión de contacto basado en monitoreo acústico (Orman, Rzeszucinski, & Pinto, 2014)	16
Figura 3 Localización de frecuencia con el monitoreo acústico (Orman, Rzeszucinski, & Pinto, 2014)	17
Figura 4 Beamforming 2D (Döbler, Heilmann, & Schnöder, 2008).....	19
Figura 5 Arreglo lineal de micrófonos con una fuente lejana	20
Figura 6 Cálculo de la distancia adicional de sonido.....	20
Figura 7 Arreglo lineal de micrófonos con una fuente cercana.....	21
Figura 8 Algoritmo DAS; amplificación de la fuente de sonido y atenuación de sonido de otras direcciones (ruido).....	22
Figura 9 Matriz a) redundante y b) no redundante	24
Figura 10 Configuración de a) array y b) co-array	25
Figura 11 Micrófono condensador Behringer ECM-8000.....	26
Figura 12 Distribución de los micrófonos (vista en perspectiva)	28
Figura 13 Distribución micrófonos(vista lateral).....	28
Figura 14 Caja de circuitos	30
Figura 15 Cronograma de actividades por semana	30
Figura 16 Resultados simulación ideal	33
Figura 17 Diagrama de flujo del plan de manufactura	36
Figura 18 Prueba de calibración	37
Figura 19 Posiciones de la fuente de sonido.....	38
Figura 20 Motor “sano” o nuevo	43
Figura 21 Motor falla 1	43
Figura 22 Motor falla 2	44
Figura 23 Análisis acústico de un motor eléctrico.....	44
Figura 24 Procesamiento de datos del motor “sano” o nuevo	45
Figura 25 Acelerómetro modelo 356A15	45
Figura 26 Ubicación del acelerómetro en el motor eléctrico.....	46
Figura 27 Dimensiones de los perfiles a)cuadrado y b)ángulo de lados iguales [mm]	47
Figura 28 Dimensiones de la estructura principal [mm].....	47
Figura 29 Estructura principal	48
Figura 30 Dimensiones del arreglo de micrófonos (doble círculo y espiral)[mm].....	48
Figura 31 Carga de micrófonos y conexiones.....	49
Figura 32 Vista lateral del arreglo cruz.....	50
Figura 33 Diagrama de carga del arreglo cruz.....	50
Figura 34 Diagrama de deflexión del arreglo cruz	51
Figura 35 Modelo 3D de la cámara acústica y el arreglo cruz.....	51
Figura 36 Resultado de deflexión del arreglo Fibonacci	52
Figura 37 Nivelador de suelo	53
Figura 38 Dimensiones de nivelador de suelos [mm].....	53
Figura 39 Dimensiones del perno de nivelador de suelo [mm]	53
Figura 40 Gabinete metálico liviano.....	54
Figura 41 Frecuencia del motor nuevo con la cámara acústica (arreglo doble círculo)	56
Figura 42 Frecuencia del motor nuevo con la cámara acústica (arreglo Fibonacci)	56

Figura 43 Espectro de vibración del acelerómetro para el motor nuevo	57
Figura 44 Frecuencia del motor dañado 1 con la cámara acústica (arreglo doble círculo)	57
Figura 45 Frecuencia del motor dañado 1 con la cámara acústica (arreglo Fibonacci).....	57
Figura 46 Espectro de vibración del acelerómetro para el motor dañado 1.....	58
Figura 47 Frecuencia del motor dañado 2 con la cámara acústica (arreglo doble círculo)	58
Figura 48 Frecuencia del motor dañado 2 con la cámara acústica (arreglo Fibonacci).....	58
Figura 49 Espectro de vibración del acelerómetro para el motor dañado 2.....	59
Figura 50 Factor de corrección de la frecuencia estimada vs frecuencia medida en el arreglo doble círculo	59
Figura 51 Factor de corrección de la frecuencia estimada vs frecuencia medida en el arreglo doble círculo	60
Figura 52 Frecuencia corregida del motor nuevo (arreglo doble círculo)	61
Figura 53 Frecuencia corregida del motor nuevo (arreglo Fibonacci)	61
Figura 54 Frecuencia corregida del motor dañado 1 (arreglo doble círculo)	61
Figura 55 Frecuencia corregida del motor dañado 1 (arreglo Fibonacci).....	62
Figura 56 Frecuencia corregida del motor dañado 2 (arreglo doble círculo)	62
Figura 57 Frecuencia corregida del motor dañado 2 (arreglo Fibonacci).....	62
Figura 58 Análisi cuantitativo.....	65
Figura 59 Cámara acústica.....	66
Figura 60 Esquema de la caja de circuitos.....	73
Figura 61 Resultado deflexión del arreglo Doble círculo.....	79
Figura 62 Resultado deflexión del arreglo Espiral	79
Figura 63 Resultado deflexión del arreglo Cruz.....	80
Figura 64 Problema de deflexión en 2D	83
Figura 65 Diagrama carga uniformemente distribuida	84
Figura 66 Dimensiones viga rectangular	85
Figura 67 Diagrama carga puntual a 1/2L de la viga.....	86
Figura 68 Diagrama carga puntual a 3/4L de la viga.....	87
Figura 69 Vista lateral del arreglo Fibonacci.....	92
Figura 70 Diagrama de carga del arreglo Fibonacci	92
Figura 71 Diagrama de deflexión del arreglo Fibonacci	92
Figura 72 Vista lateral del arreglo doble círculo	93
Figura 73 Diagrama de carga del arreglo doble círculo.....	93
Figura 74 Diagrama de deflexión del arreglo doble círculo	93
Figura 75 Vista lateral del arreglo espiral.....	94
Figura 76 Diagrama de carga del arreglo espiral	94
Figura 77 Diagrama de deflexión del arreglo espiral.....	94
Figura 78 Calibración en LabView	97
Figura 79 Segunda calibración en LabView	99
Figura 80 Archivo .xml.....	103
Figura 81 Datos adjuntos de calibración.....	103
Figura 82 Hoja de proceso para planchas de acero.....	104
Figura 83 Hoja de proceso estructura	105
Figura 84 Simbología diagrama de flujo	106

INTRODUCCIÓN

El costo de paro de una línea de producción de cualquier empresa puede ser muy elevado, y asimismo la importancia de los motores eléctricos es significativa. Un aspecto importante dentro de la industria es el análisis de la condición de una máquina; existen algunos métodos que permiten identificar una máquina en buen estado de otra que no lo está. Por mucho tiempo el mantenimiento en la industria se basó en la experiencia del ingeniero u operario de la máquina, quien alertaba de un mal funcionamiento por un sonido extraño; sin embargo, este método requiere de personas expertas en el área, las cuales han disminuido drásticamente con el pasar de los años. Ante esta problemática, la cámara acústica aparece como un método de mantenimiento predictivo en fallas internas de un equipo (Orman, Rzeszucinski, & Pinto, 2014).

La cámara acústica utiliza los mapas acústicos para su análisis; está compuesta de un arreglo de micrófonos y una cámara digital en el centro. El principio de este artefacto es interpretar la fuente de un sonido mediante una serie de señales acústicas previamente grabadas. Las relaciones de fase entre las señales acústicas se analizan y el resultado de la localización de la fuente de sonido se mapea en una fotografía de la escena monitoreada (Orman, Rzeszucinski, & Pinto, 2014). La cámara acústica es una herramienta modular y flexible adecuada para visualización, localización y análisis de fuentes de sonido por medio del método “delay & sum” o “beamformig” (Fedorko, Liptai, & Molnár, 2018).

Los micrófonos más comunes en la industria y en la investigación en cuanto a cámaras acústicas son los MEMS (Micro Electromechanical System) debido a que su reducido tamaño y bajo costo permiten el desarrollo de dispositivos de adquisición de audio de calidad cuasi profesional (Gonzalez, Rosales, Perez, Lunati, & Ortiz, 2015). Asimismo, los micrófonos con

condensadores se utilizan comúnmente para aplicaciones de muestreo de alta frecuencia (CAE Software Systems , 2021).

Independientemente de los tipos de micrófonos, los arreglos o matrices de micrófonos muestran diferentes sensibilidades hacia una determinación imprecisa del enfoque (Döbler, Heilmann, & Schnröder, 2008). La ubicación y el diseño de los micrófonos son un tema importante a considerar por los diferentes rangos de frecuencias que pueden incluso rechazar fuentes en las que no están en un sistema de equilibrio, esto ocurre principalmente por el espaciado intra sensor entre los micrófonos la cual no es el adecuado para lo longitud de onda medido.

La cámara acústica es un gran equipo intuitivo que cumple con varios requerimientos de información visual que entienden los comportamientos de un sistema. Entre las aplicaciones más comunes están: visualización de descargas parciales en una red energética, detección de fugas de aire comprimido, localización de fallas en motores eléctricos e inspección de ruido, además de aplicaciones en la industria automotriz, aeronáutica y aeroespacial (Chapuis et al., 2021).

Debido a este amplio campo de posibilidades, empresas como *CAE software systems* originaria de Alemania proveen cámaras acústicas priorizando características como la portabilidad y la simplicidad de uso (CAE Software Systems , 2021); sus modelos presentan arreglos singulares desde los 64 hasta los 112 micrófonos. Otro ejemplo es la empresa *Acoustic Camera* que ofrecen cámaras acústicas para múltiples aplicaciones como análisis de sonido, turbinas jet y hasta taladros en el sector minero. *Acoustic Camera* emplea sus arreglos de micrófonos dependiendo el tipo de aplicación que se requiera, debido a que la precisión de detección de sonido juega un papel fundamental dentro de esta industria; cuentan con un número de arreglos desde 32, 48 hasta 72 micrófonos (Acoustic Camera , 2021). Por otra parte, los modelos de *NL Acoustics*, se enfocan en la detección de fallas en hospitales tales como

derrames en tuberías y a su vez detección de fallas en componentes eléctricos como torres de cables de alta tensión y transformadores eléctricos. Los productos que ofrecen estas empresas (micrófonos, cámaras y softwares digitales), suelen ser una inversión costosa, pero la ventaja de detección de fallas permite a sus clientes ahorrar grandes sumas de dinero (NL Acoustics , 2021).

Debido a los altos costos de producción de cámaras acústicas Mediavilla (2019) propone un modelo utilizando 16 micrófonos condensadores Behringer ECM-8000 conformados en un arreglo en forma de espiral y una interfaz amigable con el usuario; esta interfaz consiste en la implementación de un “virtual instrument” (VI) en el software LabView 2017, la cual permitirá la conexión con el hardware, activar el proceso de medición y registro de datos del análisis acústico. También propone el uso de la librería Acoular (versión 19.08), encargada de procesar los datos y permitir al usuario obtener una imagen del escenario estudiado con un mapa de nivel de presión sonora sobrepuesta indicando así los resultados del análisis evitando la ejecución del software Python. No obstante, el autor sugiere que los resultados del análisis acústico de este modelo son poco precisos por lo cual recomienda una nueva propuesta de arreglo de micrófonos.

Como se menciona previamente, entre las aplicaciones de la cámara acústica está el análisis preventivo de un motor eléctrico; este método de diagnóstico ha cobrado mayor popularidad en los últimos años a pesar de que la calidad del monitoreo acústico dependa, en gran medida, del ruido de fondo del entorno en el que se opera la máquina. Por lo tanto, a partir de la amplia disponibilidad de sensores como acelerómetros (instrumentos que miden las vibraciones) induce a los ingenieros a utilizar estos sistemas de monitoreo cuando notan un sonido anormal; sin embargo, estas soluciones aumentan la cantidad de esfuerzo requerido debido a que es necesario realizar varias mediciones al no saber el punto específico del que proviene el sonido anormal (Orman, Rzeszucinski, & Pinto, 2014).

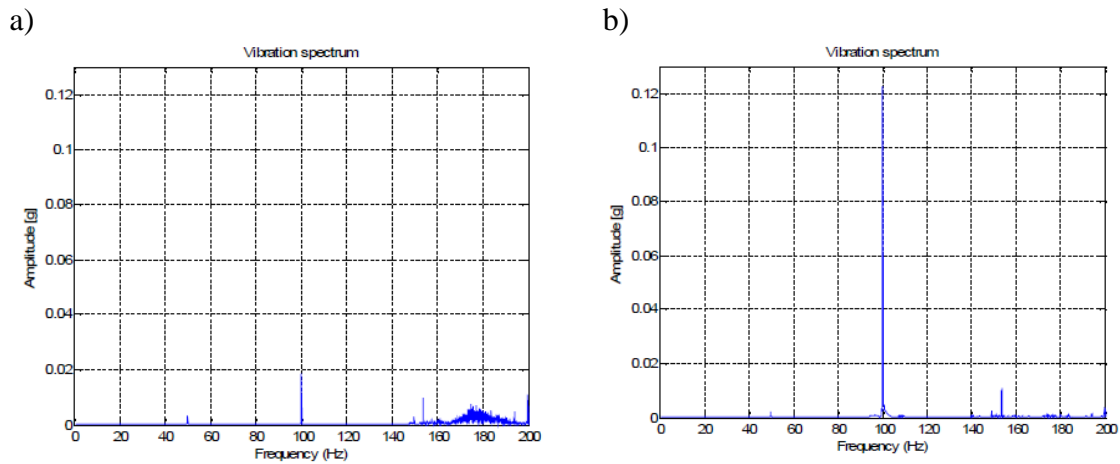


Figura 1 Espectros de vibración de un motor a) sano y b) excentricidad y distorsión de contacto basado en la medición de vibraciones (Orman, Rzeszucinski, & Pinto, 2014)

El análisis acústico se presenta como una solución para el diagnóstico de objetos de interés y con una ventaja frente a sistemas de monitoreo basados en la medición de vibraciones, corrientes, temperatura o voltaje, puede ubicar el punto específico del problema. En el caso de un motor eléctrico, utiliza los parámetros de frecuencia del análisis acústico de un motor funcional para detectar sonidos anormales de un motor averiado, además de detectar la ubicación de la fuente de sonido de la frecuencia de interés (Orman, Rzeszucinski, & Pinto, 2014).

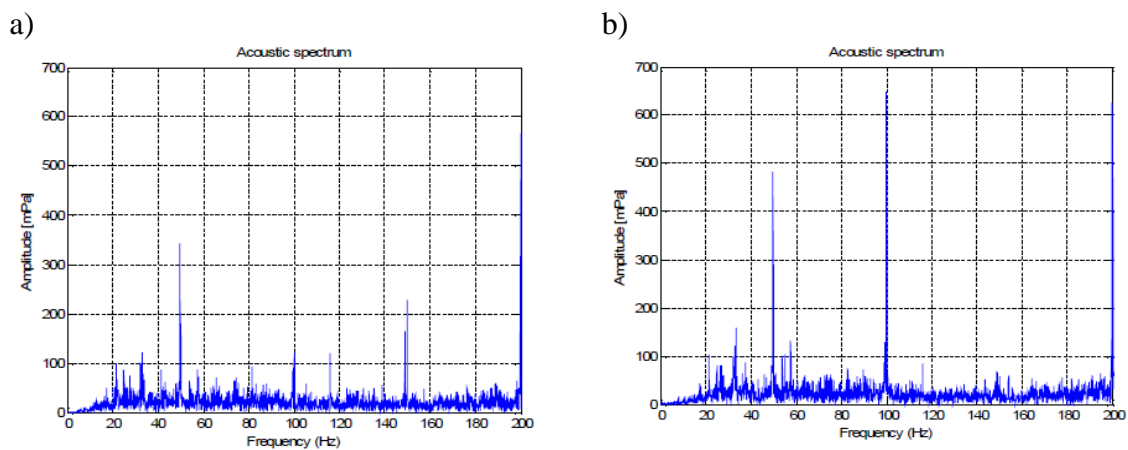


Figura 2 Espectros de vibración de un motor a) sano y b) excentricidad y distorsión de contacto basado en monitoreo acústico (Orman, Rzeszucinski, & Pinto, 2014)

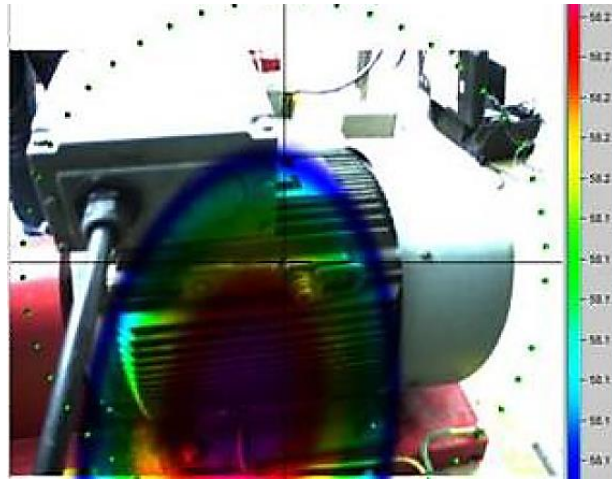


Figura 3 Localización de frecuencia con el monitoreo acústico (Orman, Rzeszucinski, & Pinto, 2014)

Definición del problema y especificaciones del proyecto

El objetivo de este trabajo es presentar un prototipo de una cámara acústica funcional y de bajo costo que sea capaz de detectar fallas internas en motores eléctricos. Se precisa que el modelo distinga fuentes de sonido estáticas y las caracterice mediante el uso de los software Python y LabView en conjunto con la librería de libre acceso “Acoular”; este último contiene implementaciones con algoritmos que procesan las señales de los micrófonos (Sarradj & Herold, 2017). La estructura de este modelo permitirá la disponibilidad de 4 diferentes arreglos de 16 micrófonos condensadores Behringer ECM-8000, además de permitir un ajuste que alcance los 90°, es decir que pueda acomodarse horizontalmente sin comprometer su funcionamiento; este tipo de estructura facilitará el análisis para el motor eléctrico.

Se analizará tres motores eléctricos idénticos en la cámara acústica; dos motores poseen una falla interna y uno de ellos es nuevo. A partir de los resultados obtenidos se pretende identificar las frecuencias de falla del motor y validar esta medición con los valores obtenidos en un acelerómetro piezoeléctrico; además, se presentará la ubicación las fallas identificadas con la imagen de espectro del monitoreo acústico que presenta el software LabView.

Requerimientos

- 16 micrófonos condensadores Behringer ECM-8000 (sensibilidad de 70dB).
- Una estructura móvil con disposición para 3 diferentes arreglos de micrófono.
- Un chasis cDAQ 9178 con 4 módulos NI 9234 que grabará las señales de los micrófonos simultáneamente.
- Un gabinete que permita un transporte seguro de los componentes eléctricos.
- Una cámara web que registrará fotografías de los escenarios a analizar; estará conectada vía USB a una computadora.
- Se grabará las señales de los micrófonos y la cámara digital al mismo tiempo.
- Se realizará el procesamiento de datos después del registro de los mismos (cámara digital y micrófonos).
- Se usará el algoritmo Beamforming para producir el mapa acústico.
- Se implementará un “virtual instrument” (VI) en el software LabView 2017 que permitirá conectarse con el hardware, activar el proceso de medición y registro de datos.
- Se requiere el uso de la librería Acoular (versión 19.08) para el procesamiento de datos.
- El usuario será capaz de controlar el proceso y observar los resultados en un solo gráfico sin ejecutar el software Python por separado.
- Se requiere de tres motores eléctricos del mismo modelo (potencia y frecuencia); un motor debe operar normalmente sin ninguna dificultad o falla, y los otros dos motores deberán presentar fallas internas.

- Se requiere de un acelerómetro piezoeléctrico que permitirá medir las vibraciones de los tres motores, y generar datos de comparación para con los resultados de la cámara acústica.

Conceptos de diseño y selecciones

Arreglo o matriz de micrófonos

Una cámara acústica consiste en un arreglo de N micrófonos, 16 en este caso, que, por medio de procesamiento de una señal sonora, determina la posición de una fuente de sonido en el espacio. La captación de sonido es determinada por la técnica de *acoustic beamforming*, la cual se encarga de procesar las señales que capta una matriz de micrófonos. Es decir, mientras la matriz produce un muestreo espacial de un campo de sonido, el algoritmo *beamforming* realiza un filtrado espacial, la cual mapea la distribución de fuentes de sonido a una cierta distancia, y localiza las más fuertes. La técnica de *beamforming* se encarga de mejorar la relación señal-ruido de las señales recibida, enfocar las señales transmitidas a ubicaciones específicas y eliminar fuentes de interferencia (MathWorks, n.d.).

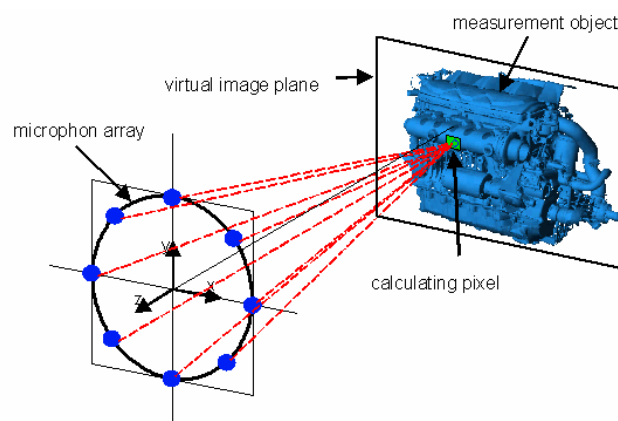


Figura 4 Beamforming 2D (Döbler, Heilmann, & Schnröder, 2008)

Debido a la variación geométrica entre una matriz de micrófonos, el sonido llega a cada micrófono en diferentes tiempos; a este tiempo de demora se lo denomina *Time Difference of*

Arrival (TDOA), el cual se lo puede utilizar para localizar la fuente de sonido. Agregar el retardo de tiempo (*delay*) a cada micrófono en la matriz permite dirigir el patrón de directividad (*directivity pattern*), es decir, la formación de haces, el cual es un tipo de procesamiento de señales que permite localizar la fuente de sonido (Grubesa, Stamac, Krizanic, & Petosic, 2019).

El TDOA puede presentarse en 2 casos; el arreglo de micrófonos lejos y cerca de la fuente de sonido. Si se analiza un arreglo lineal de micrófonos como se indica en la figura 2 en el primer caso la fuente de sonido “viajara” como una onda plana, lo cual figura en un ángulo incidente θ , respecto al eje de la matriz, igual para todos los micrófonos.

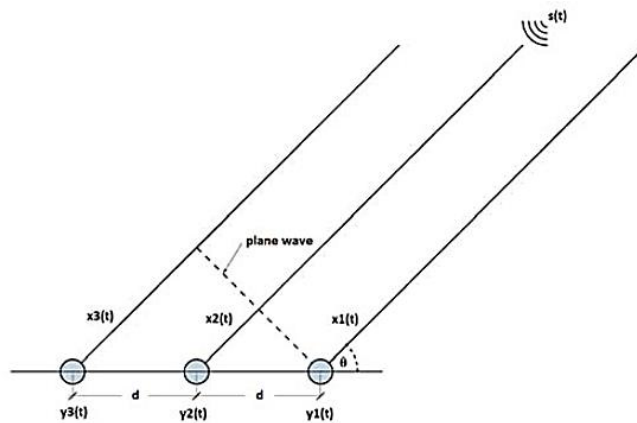


Figura 5 Arreglo lineal de micrófonos con una fuente lejana

Si la fuente de sonido es $s(t)$, la distancia adicional x que debe “viajar” el sonido para cada micrófono respecto al micrófono de referencia $y_1(t)$ será igual a

$$x = d_i \cdot \cos \theta$$

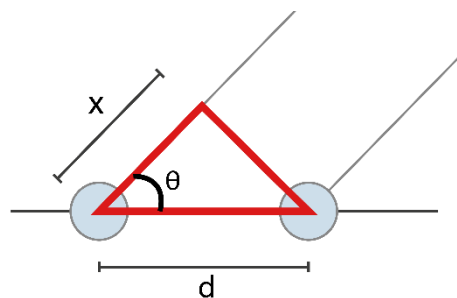


Figura 6 Cálculo de la distancia adicional de sonido

En donde d_i será igual a la distancia de cada micrófono m_i respecto al micrófono de referencia. Para este caso de arreglo lineal con posiciones equidistantes, la distancia es igual a $d_i = d$. Por lo tanto, el TDOA puede ser calculado como

$$\tau_i = \frac{d_i \cdot \cos \theta_k}{c} = \frac{id \cos \theta}{c}$$

Siendo c la velocidad del sonido en el aire ($c = 343m/s$).

Para cada micrófono, en este caso, la señal se define como:

$$x_i(t) = s_k(t - \tau_i)$$

Y cada señal puede representarse por el cambio de fase de la señal entrante:

$$x_i(t) = s_k(t) e^{-j\omega_0 \tau_i}$$

$$x_i(t) = s_k(t) e^{-\frac{j2\pi f_0 d_i \cos \theta_k}{c}}$$

Si $\lambda = c/f_0$

$$x_i(t) = s_k(t) e^{-\frac{j2\pi d_i \cos \theta_k}{\lambda}}$$

En el segundo caso (campo cercano), los cálculos son más complejos debido a que el ángulo de incidencia no será el mismo.

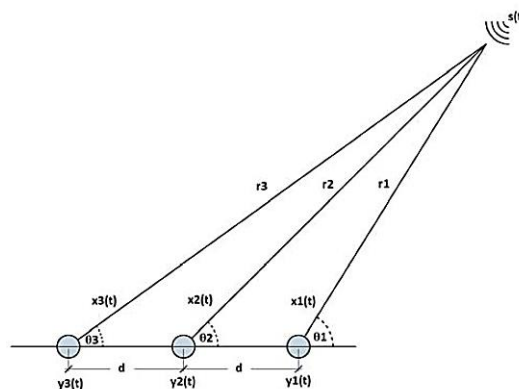


Figura 7 Arreglo lineal de micrófonos con una fuente cercana

Las distancias para cada micrófono del caso de un arreglo lineal se calculan usando la regla de cosenos.

$$r_2^2 = r_1^2 + d^2 + 2r_1d \cos \theta_1$$

$$r_3^2 = r_1^2 + 4d^2 + 4r_1d \cos \theta_1$$

Por lo tanto, el TDOA se define como:

$$\tau_{12} = \frac{r_2 - r_1}{c} \quad \tau_{13} = \frac{r_3 - r_1}{c}$$

Los valores de θ_1 , r_1 , r_2 y r_3 se calculan a partir de la resolución del sistema de ecuaciones, en donde τ_{12} y τ_{13} se obtienen por medio del procesamiento de señales grabadas por el arreglo de micrófonos.

Uno de los algoritmos más comunes y simples de beamforming es *Delay and Sum* (DAS), el cual consiste en que “las señales de los micrófonos individuales puedan ser retardadas por el TDOA calculado para obtener una suma constructiva de las señales provenientes de la dirección deseada” (Grubesa, Stamac, Krizanic, & Petosic, 2019). Asimismo, las señales que provienen de otras direcciones son desfasadas y resumidas destructivamente.

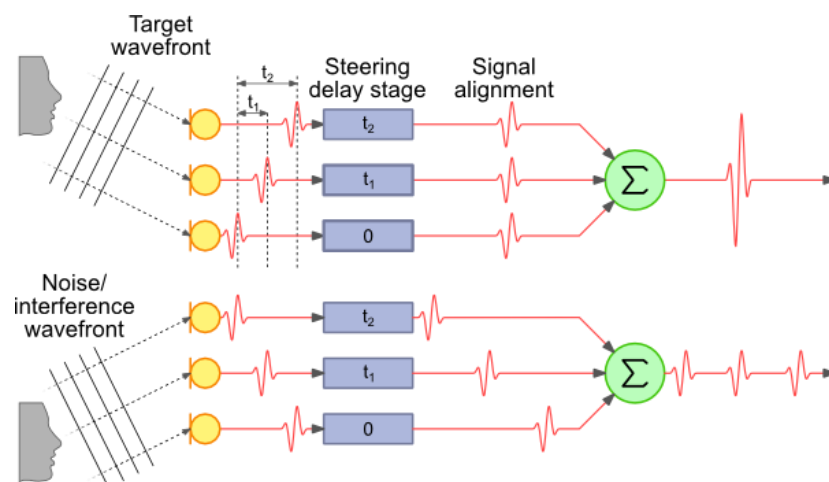


Figura 8 Algoritmo DAS; amplificación de la fuente de sonido y atenuación de sonido de otras direcciones (ruido).

Para explicar este algoritmo se asume un escenario en un campo lejano, una señal cercana y los micrófonos con las mismas intensidades de sonido W . Posterior a la grabación de la fuente de sonido con el arreglo de micrófonos, se determina el TDOA tomando en cuenta si el valor del ángulo de incidencia es conocido o no. Como tercer paso un tiempo de demora es agregado a las señales grabadas de manera que todas las señales tengan la misma fase; esta señal de demora se define para cada micrófono como:

$$y_i(t) = w_i s[t - \tau_i(\theta)] + v_i(t)$$

$$y_i(t) = x_i(t) + v_i(t), i = 1, 2, 3, \dots, M$$

En donde w_i representa la intensidad del sonido y se define como:

$$W = I \cdot 4\pi r^2$$

Siendo I la intensidad de una fuente puntual.

Asimismo, $s(t)$ representa la fuente de sonido, $\tau_i(\theta)$ la demora de la señal grabada y $v_i(t)$ es igual al ruido. Al combinar ambas ecuaciones se obtiene el total de la señal de salida.

$$y(t) = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^M y_i = \frac{1}{M} \sum_{i=0}^M [x_i(t) + v_i(t)]$$

A esta última ecuación se la divide por la cantidad de micrófonos en la matriz con el valor de la señal que es aproximadamente igual a la señal emitida por la fuente de sonido; se presenta la ecuación en decibelios:

$$y_{db} = 20 \log_{10} \frac{1}{M} \sum_{i=0}^{M-1} e^{\frac{j2\pi f i d \cos \theta}{c}}$$

(Grubesa, Stamac, Krizanic, & Petosic, 2019).

De acuerdo con Chiariotti, al diseñar una prueba con la técnica beamforming, es necesario tomar en cuenta ciertos criterios para maximizar los resultados de la matriz de micrófonos, estos son: desempeño, diseño y calibración (2019).

En cuanto al desempeño de la matriz de micrófonos se consideraron dos parámetros: *spatial aliasing* y el parámetro F.

Spatial aliasing

Este fenómeno "ocurre cuando la apertura de la matriz no es muestreada adecuadamente en el espacio por los sensores para espacio por los sensores para una longitud de onda dada" (Chiariotti, Martarelli, & Castellini, 2019). En otras palabras, el aliasing se presenta cuando la velocidad de muestreo es muy baja y, en consecuencia, reproduce una señal de onda equivocada.

En un mapa acústico, el aliasing produce fuentes fantasmas similares a las verdaderas impidiendo una lectura acertada de resultados. Una opción que reduce el aliasing es el criterio de Nyquist, el cual plantea que la velocidad de muestreo no exceda el doble de la longitud de onda. Sin embargo, la mejor alternativa para reducir el aliasing es evitar matrices regulares o también llamadas redundantes (Chiariotti, Martarelli, & Castellini, 2019).

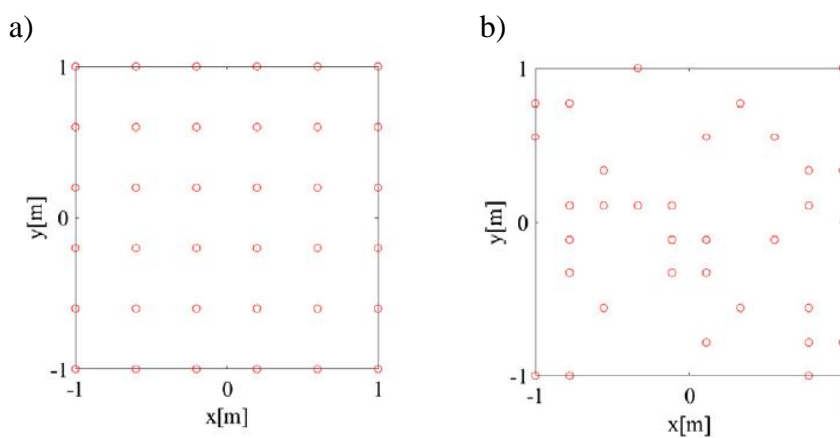


Figura 9 Matriz a) redundante y b) no redundante

Co-array y el parámetro F

El co-array es la gráfica de los espaciados vectoriales de cada micrófono M ; describe la configuración o forma de la matriz.

a)

ARRAY



b)

CO ARRAY

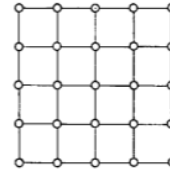


Figura 10 Configuración de a) array y b) co-array

Al diseñar un co-array se obtiene los vectores de coordenadas de los micrófonos, cada vector se considera como \vec{x}_m , entonces, la matriz conjunta se obtiene a partir de la siguiente ecuación (Haubricit, 1968).

$$\vec{X} = \vec{x}_m - \vec{x}_n \text{ donde, } m = 1 \dots M, \quad n = 1 \dots M$$

De tal forma que se forma una matriz $M \times M$. Es posible medir la no redundancia de la matriz como el número de espaciamientos vectoriales diferentes U ; correspondientemente la no redundancia de la matriz se contempla como el número máximo U_{max} de vectores únicos en la matriz del co-array y se define como:

$$U_{max} = M^2 - (M - 1)$$

El parámetro F se figura como un indicador de calidad de la matriz de un arreglo de micrófonos. Este índice de calidad de la matriz es igual a la relación entre el número real de espaciados vectoriales y el máximo.

$$F = \frac{U}{U_{max}} = \frac{U}{M^2 - (M - 1)} \leq 1$$

A partir de esta relación, es evidente que, para un arreglo irregular óptimo, el factor de calidad se mantendrá igual a uno ($F = 1$), para lo cual es necesario no repetir distancias entre micrófonos (Chiariotti, Martarelli, & Castellini, 2019).

Adicionalmente, otro aspecto importante a considerar es la cantidad de micrófonos; el número que se utiliza en un arreglo determina la precisión del equipo en cuanto a la ubicación de la fuente de sonido, mientras mayor sea la cantidad de micrófonos que utiliza un arreglo, el espacio de estudio será mayor, y, por tanto, la precisión en la ubicación del sonido aumentará (Grubesa, Stamac, & Suhanek, 2019).

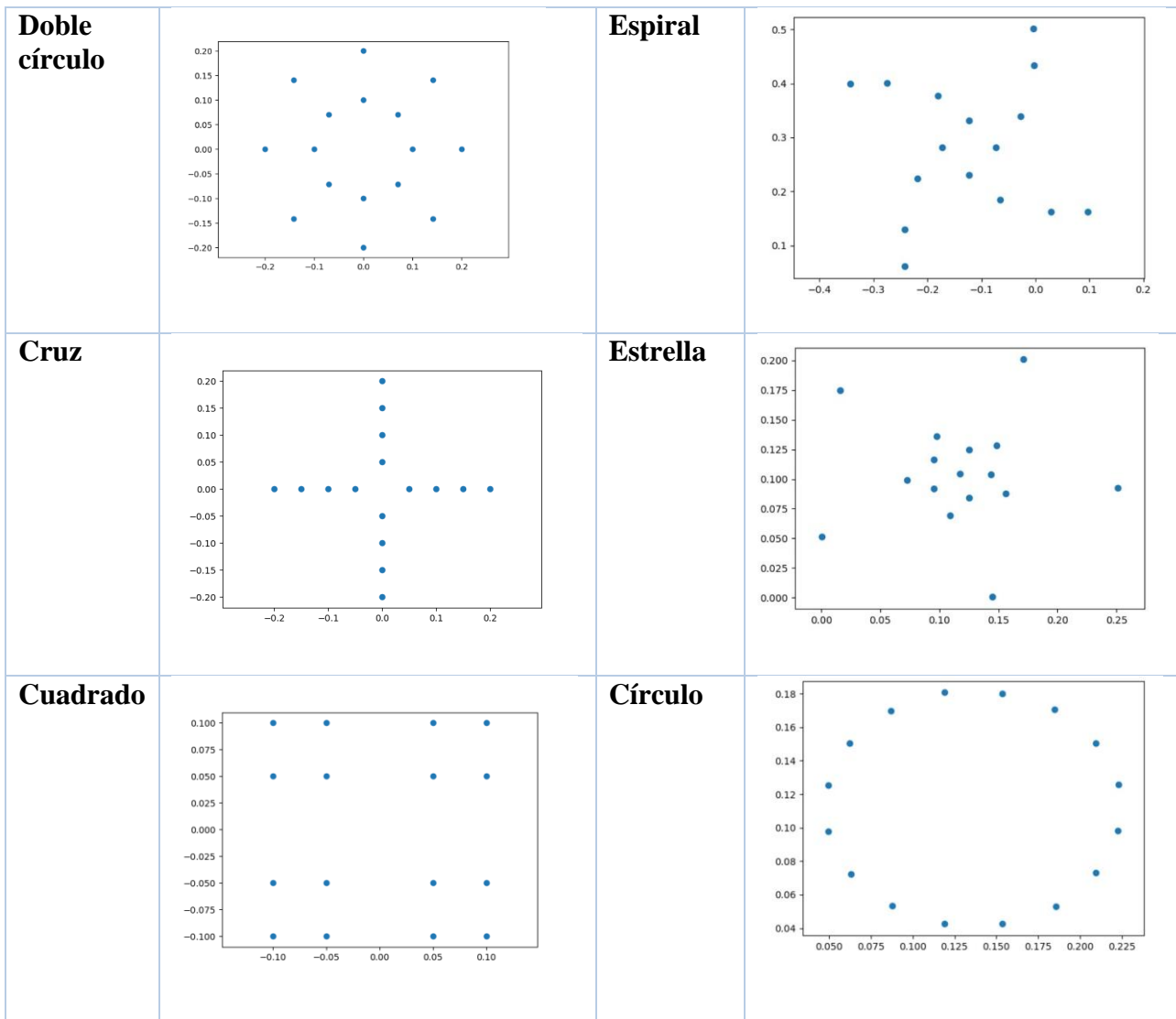
A partir de los criterios descritos, y la disponibilidad de 16 micrófonos condensadores Behringer ECM-8000 con una sensibilidad de 70dB se presentan 8 propuestas de arreglos o matrices de micrófonos.



Figura 11 Micrófono condensador Behringer ECM-8000

Tabla 1 Ubicación de las propuestas de arreglos de micrófonos

Arreglo	Ubicación	Arreglo	Ubicación
Caracol		Fibonacci	



Estructura

La estructura en la que se asentarán los micrófonos debe asegurar una correcta nivelación entre el suelo y el diafragma de cada micrófono; además de fijar y asegurar que cada micrófono se encuentra perpendicular respecto al suelo. Esta estructura debe ser capaz de soportar el peso de 16 micrófonos y sus respectivos cables conectores (4.149 kg de peso total) dispuestos en la distribución de los arreglos seleccionados y una webcam ubicada en el centro de los mismos. Puesto que la cámara acústica se concentrará en la evaluación de un motor eléctrico, es importante resaltar el tamaño de la zona en donde se encontrarán los

arreglos, ya que este debe ser suficientemente grande de modo que abarque el objeto a evaluar sin problema.

Con la finalidad de asegurar estabilidad y una correcta posición de los micrófonos (perpendiculares respecto al piso) se propone un sistema de sujeción de dos planchas metálicas. El par de planchas metálicas contendrán perforaciones que obedezcan a los modelos de arreglos seleccionados; una primera plancha estabilizará la parte inferior de los micrófonos y la segunda plancha metálica se encargará de sostener la parte superior (más cercana al diafragma) del micrófono además de la webcam.

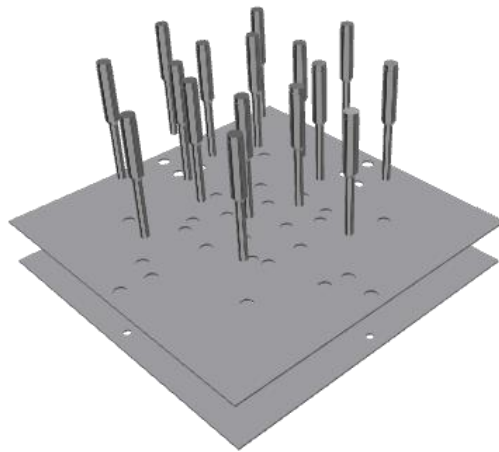


Figura 12 Distribución de los micrófonos (vista en perspectiva)

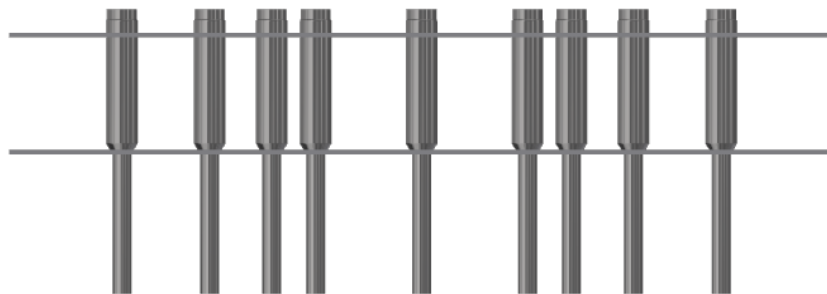


Figura 13 Distribución micrófonos (vista lateral)

Se ha resaltado la importancia de la estabilidad de la estructura para las mediciones pertinentes por lo que es necesario adaptar niveladores de suelo con pernos que permitan ajustar y adecuar la estructura en una superficie.

Diagrama eléctrico power supply

Las vibraciones captadas por el micrófono se transforman en señales eléctricas análogas; la salida del pulso eléctrico es pequeña y requiere de un amplificador de manera que la señal sea procesada y digitalizada, y posteriormente se convierta en valores numéricos; estos se encargan de indicar la intensidad en función del tiempo en el ordenador.

En el caso de los micrófonos condensadores (MIC) es necesario conectar un preamplificador que aumenta el nivel de señal hasta valores que permita al amplificador detectarlas. Asimismo, la cámara acústica necesita de este sistema, que permita un mayor nivel de detección de la señal del micrófono y que el cDAQ pueda captar y procesar la señal hasta obtener una respuesta auditiva en la computadora.

Caja de circuitos

Con el fin de perfeccionar el prototipo anterior, es necesario realizar adaptaciones en la caja de circuitos como una caja metálica que permita almacenar las placas de circuito impreso de manera ordenada, así también que cuente con las entradas y salidas necesarias para los micrófonos condensadores Behringer ECM-8000. Este equipo debe contar con los espacios para la conexión de la Webcam, y las fuentes de poder; así también es necesario la implementación de un regulador de voltaje, lo cual asegurará un correcto funcionamiento.



Figura 14 Caja de circuitos

Manejo del proyecto

A continuación, se presenta el cronograma de planificación del proyecto de acuerdo al tiempo establecido:

Id.	Nombre de tarea	Comienzo	Fin	Sep 2021			Oct 2021				Nov 2021				Dec 2021		
				12/9	19/9	26/9	3/10	10/10	17/10	24/10	31/10	7/11	14/11	21/11	28/11	5/12	
1	Definición del proyecto	9/13/2021	9/21/2021	■													
2	Reunión con el cliente	9/21/2021	9/30/2021	■													
3	Investigación	9/21/2021	9/30/2021	■													
4	Conexión y prueba de equipos	10/4/2021	10/7/2021				■										
5	Revisión programas	10/4/2021	10/12/2021				■										
6	Definición de arreglos	10/11/2021	10/15/2021				■										
7	Propuestas de estructura	10/4/2021	10/15/2021				■										
8	Diseño CAD	10/13/2021	10/18/2021				■										
9	Cálculos de diseño	10/28/2021	11/11/2021								■						
10	Cotización de materiales y fabricación	10/28/2021	11/3/2021								■						
11	Fabricación	11/3/2021	11/15/2021								■						
12	Reporte de progreso	11/4/2021	11/11/2021								■						
13	Ensamblaje caja de circuitos	11/15/2021	11/17/2021								■						
14	Ensamblaje de equipo completo	11/17/2021	11/19/2021								■						
15	Pruebas con el equipo	11/22/2021	11/26/2021								■						
16	Modificaciones finales	11/26/2021	11/30/2021								■						
17	Preparación presentación final	11/30/2021	12/13/2021								■						
18	Presentación proyecto final	12/13/2021	12/13/2021								■						

Figura 15 Cronograma de actividades por semana

Estándares de ingeniería

- Norma: NTP 588: Grado de protección de las envolventes de los materiales eléctricos.

Esta norma indica los envolventes para equipos eléctricos y la protección contra agentes externos tanto líquidos como sólidos para el contenedor de circuitos. En este caso, se tiene que el índice de protección será IP 64 e IK 10, donde IP 64 es una protección de chorros de agua en todas las direcciones e IK 10 corresponde a una resistencia de energía de choque de 20 Julios (Piqué, 2001).

MATERIALES Y MÉTODOS

Métodos

Beamforming

Con el fin de observar las respuestas de cada arreglo de micrófonos y seleccionar las propuestas adecuadas, se recurre al lenguaje de programación Python en conjunto con la librería Acoular (versión 19.08); se delimita un espacio vectorial con tres fuentes de sonido en diferentes intensidades (presión del sonido [Pa]), estas señales se muestrean a 51200 Hz durante 1 segundo, y se distribuyen de la siguiente manera:

Tabla 2 Ubicación y presión de las fuentes de sonido generadas en Python

Fuente	Ubicación espacial (x, y, z) [m]	Rms presión del sonido [Pa]
1	(-0.1, -0.1, 0.3)	1
2	(0.15, 0, 0.3)	0.7
3	(0, 0.1, 0.3)	0.5

Posteriormente se incluye la ubicación de cada micrófono en términos de x y y en el espacio vectorial generado y se genera la respuesta de la recepción de las fuentes de sonido; se realiza para cada propuesta de arreglo.

El objetivo de las nuevas propuestas de arreglos es identificar las fuentes de sonido reduciendo el efecto *Aliasing*; este efecto causa que las señales continuas se transformen en indistinguibles al realizar un muestreo de sonido de hasta 8000 Hz. La siguiente figura presenta el resultado ideal de la simulación, no obstante, el arreglo se compone de 64 micrófonos.

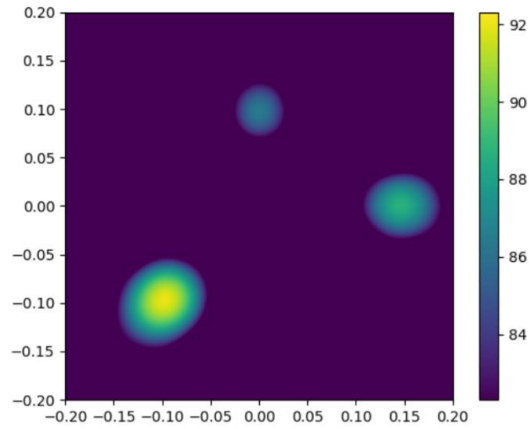
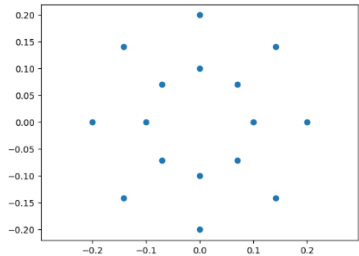
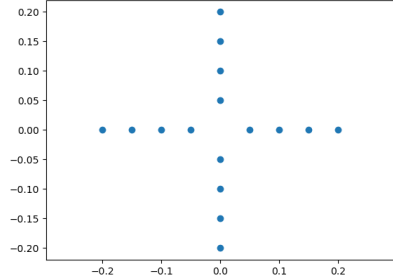
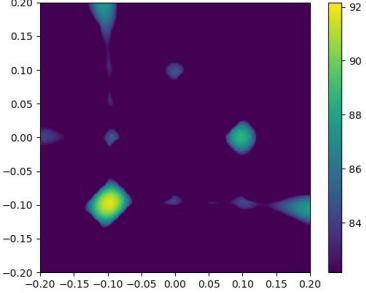
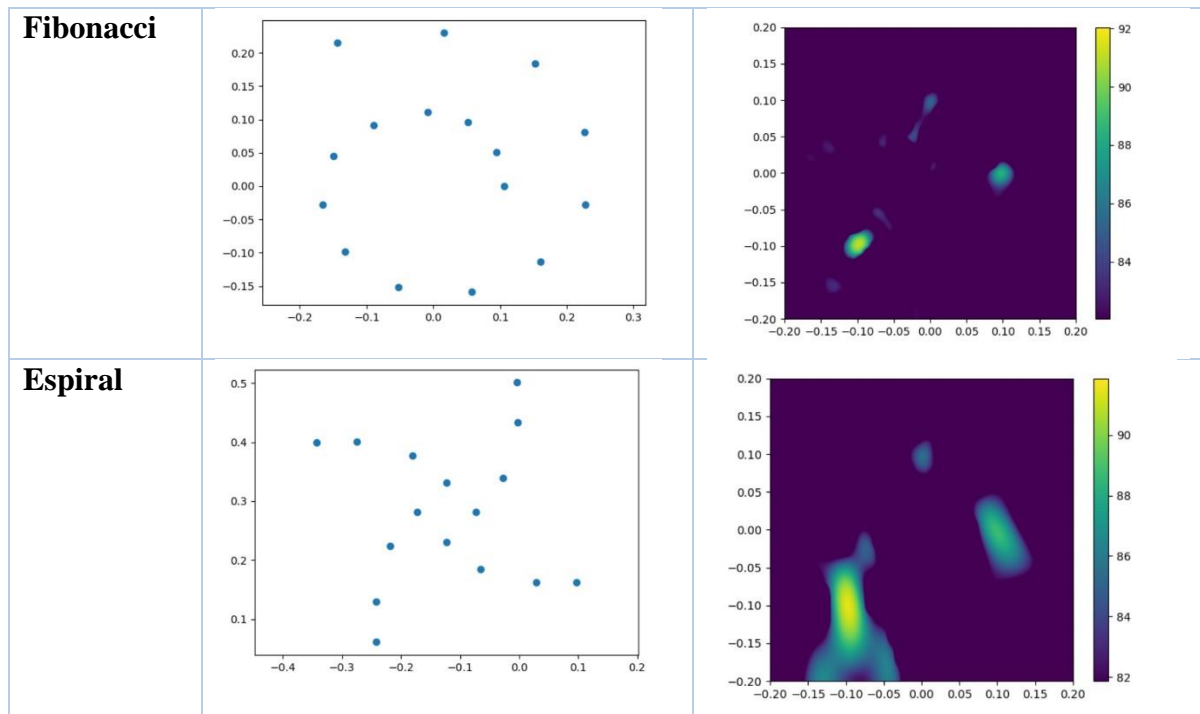


Figura 16 Resultados simulación ideal

En la siguiente tabla se identifica el nombre del arreglo, la posición en el espacio de los arreglos y la respuesta correspondiente de la fuente de sonido generada en Python.

Tabla 3 Propuestas de arreglos y su respuesta en Python

Arreglo	Ubicación	Respuesta
Doble círculo		
Cruz		



Las respuestas graficas que ubican mejor las 3 fuentes de sonido y generan menor ruido (fuentes de interferencia no deseada) corresponden a los arreglos nombrados como doble círculo y espiral, sin embargo, se consideran también los arreglos Fibonacci y cruz; a pesar de que este primer arreglo no detecta la ubicación exacta de las fuentes de sonido, reduce en gran medida las fuentes de interferencia a su alrededor; por otra parte el arreglo cruz falla en la eliminación de fuentes no deseadas, no obstante, enfoca las señales transmitidas en sus ubicaciones específicas.

Las respuestas de simulación de todos los arreglos se presentan en el ANEXO B.

Parámetro F

El cálculo del parámetro F se lo realiza a partir del código generado en Matlab, el cual identifica las matrices únicas y los elementos de la función del parámetro F. Se define la matriz para cada uno de los 4 arreglos seleccionados previamente en el código de Matlab ubicado en el ANEXO D. Los resultados obtenidos para cada arreglo seleccionado se resumen en la siguiente tabla:

Tabla 4 Resultados parámetro F

Arreglo	# Vectores cero	U	U max	Parámetro F
Cruz	16	8	241	0.0332
Doble circulo	16	16	241	0.4914
Fibonacci	16	240	241	0.9959
Espiral	16	220	241	0.9129

Los arreglos que presentan un valor próximo a 1 son Fibonacci y espiral, lo cual los convierte en matrices ideales; en contraste, el arreglo cruz indica un valor lejano a 1.

A partir de los resultados obtenidos, se mantiene la previa selección de arreglos, considerando que a pesar de los valores lejanos a 1 de los arreglos cruz y doble círculo en el parámetro F, sus respuestas en la simulación en Python son bastante satisfactorias en cuanto a ubicación y reducción de fuentes de interferencia.

Selección de materiales y componentes

Estructura metálica

A partir de las recomendaciones del prototipo de cámara acústica de Mediavilla (2019) se selecciona como material principal al acero ASTM A36 o también conocido como acero negro con la finalidad de minimizar el riesgo de desfases y evitar resultados erróneos por el mal posicionamiento de los micrófonos; este material es de fácil acceso comercial y posee propiedades de resistencia adecuadas. Asimismo, se resalta su fácil maquinabilidad y ensamblaje.

La estructura externa está constituida por perfiles cuadrados debido a que su forma cuadrada es ventajosa en la construcción de armazones metálicos. Para la estabilidad de las planchas metálicas que contienen los arreglos se utilizó perfiles en L para mayor simplicidad y ocupación del espacio. Tanto los perfiles cuadrados, los perfiles en L y las planchas se constituirán del acero ASTM A-36.

Caja de circuitos

La pintura electrostática es ideal en la protección contra la corrosión; se lo utiliza para recubrir contenedores metálicos encargados de proteger elementos tales como circuitos, fusibles, entre otros componentes de esta área. De este modo se estableció como condición el uso de este recubrimiento en la selección del material a usar en la caja de circuitos. Este elemento está constituida por 16 puertos de entrada para cada micrófono y en su parte posterior la misma cantidad de puertos de salida, las cuales se dirigen al cDAQ.

Diseño para la fabricación

Proceso de fabricación

Los componentes a fabricar incluyen: estructura metálica para micrófonos, planchas metálicas con los arreglos de micrófonos y el contenedor de circuitos.

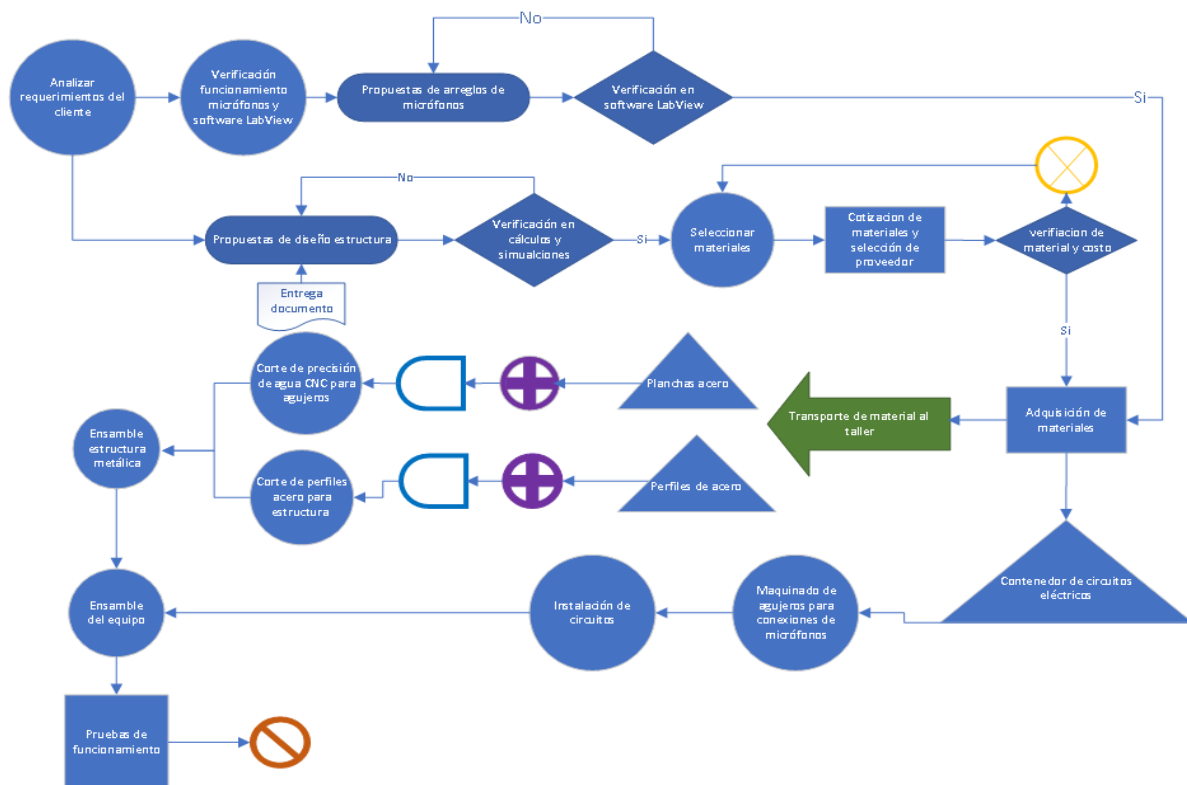


Figura 17 Diagrama de flujo del plan de manufactura

Los detalles de proceso se detallan en el ANEXO G.

Experimento de ingeniería para verificación

Con el fin de garantizar que los resultados de monitoreo acústico tanto de ubicación como de frecuencia son correctos, es importante que la cámara acústica acredite su funcionamiento por medio de una serie de calibraciones; estas pruebas consisten en evaluar la respuesta de la cámara acústica ante los parámetros de posición, distancia, número de fuentes y rango de frecuencia con los cuatro arreglos de micrófonos: espiral, cruz, doble círculo y Fibonacci.

La calibración de cada micrófono previo a la realización de las siguientes pruebas se explica en el ANEXO F.

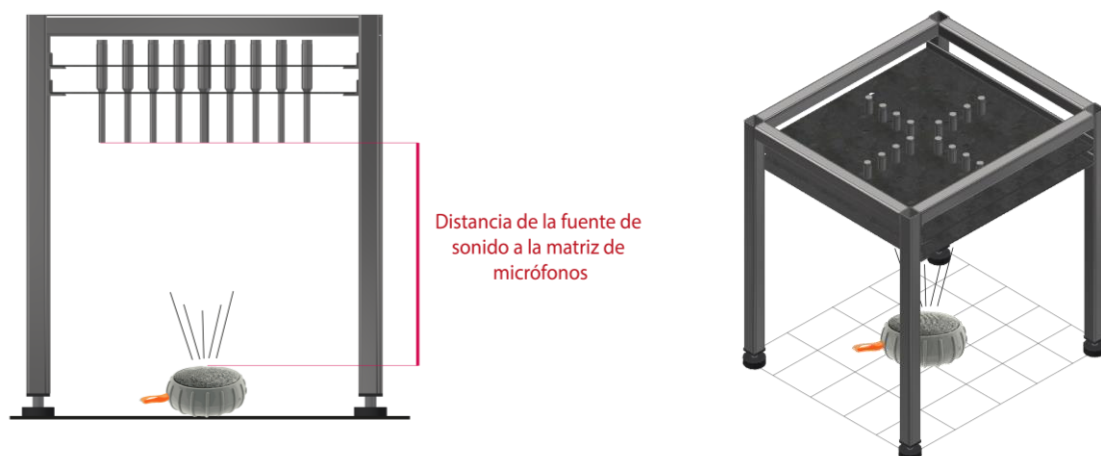


Figura 18 Prueba de calibración

Se establece un plano con un total de 13 posiciones con el fin de identificar la ubicación de la fuente de sonido; de esta manera es posible conservar exactitud en la recolección de datos en cuanto a ubicación.

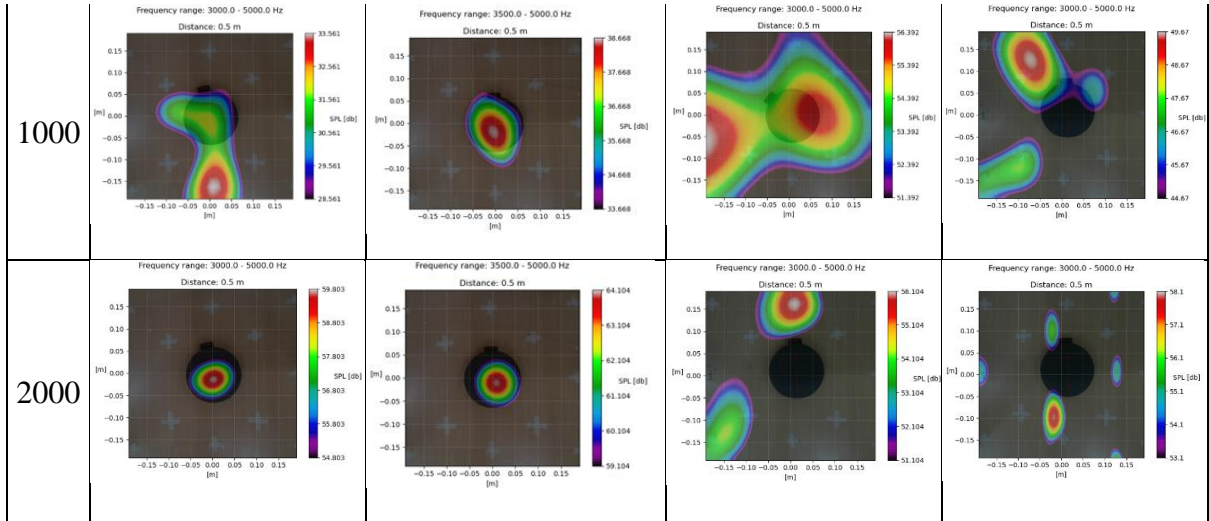
6		7		8
	2		3	
13		1		9
	5		4	
12		11		10

Figura 19 Posiciones de la fuente de sonido

La primera prueba de calibración consiste en una sola fuente de sonido, un parlante inalámbrico, a una distancia desde la webcam hasta la fuente de 0.5m en la posición 1 a diferentes frecuencias.

Tabla 5 Resultados primera prueba de calibración

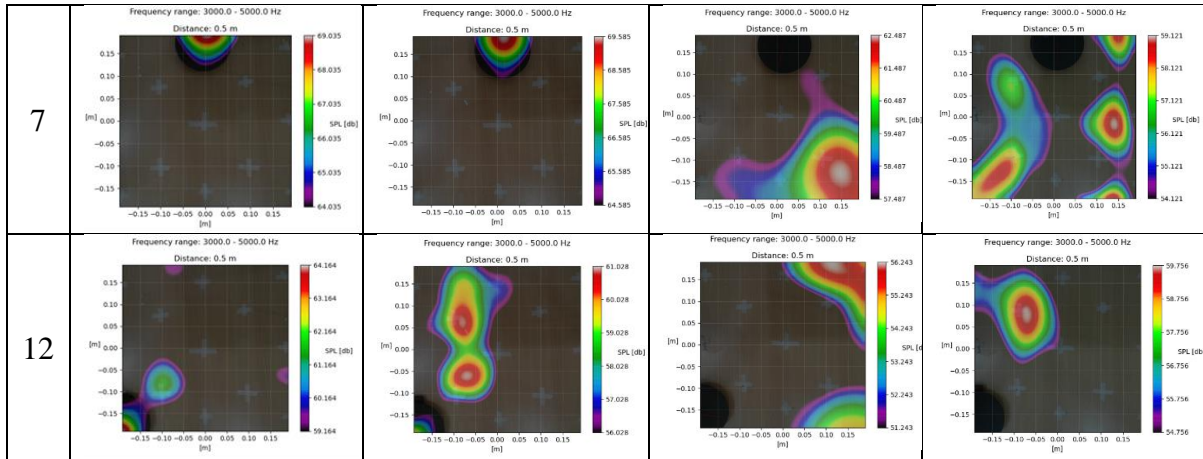
Frecuencia (Hz)	Filbonacci	Doble Circulo	Espiral	Cruz
200				
500				
800				



La segunda prueba de calibración consiste en una sola fuente de sonido a una distancia desde la webcam hasta la fuente de 0.5m en diferentes posiciones a una misma frecuencia.

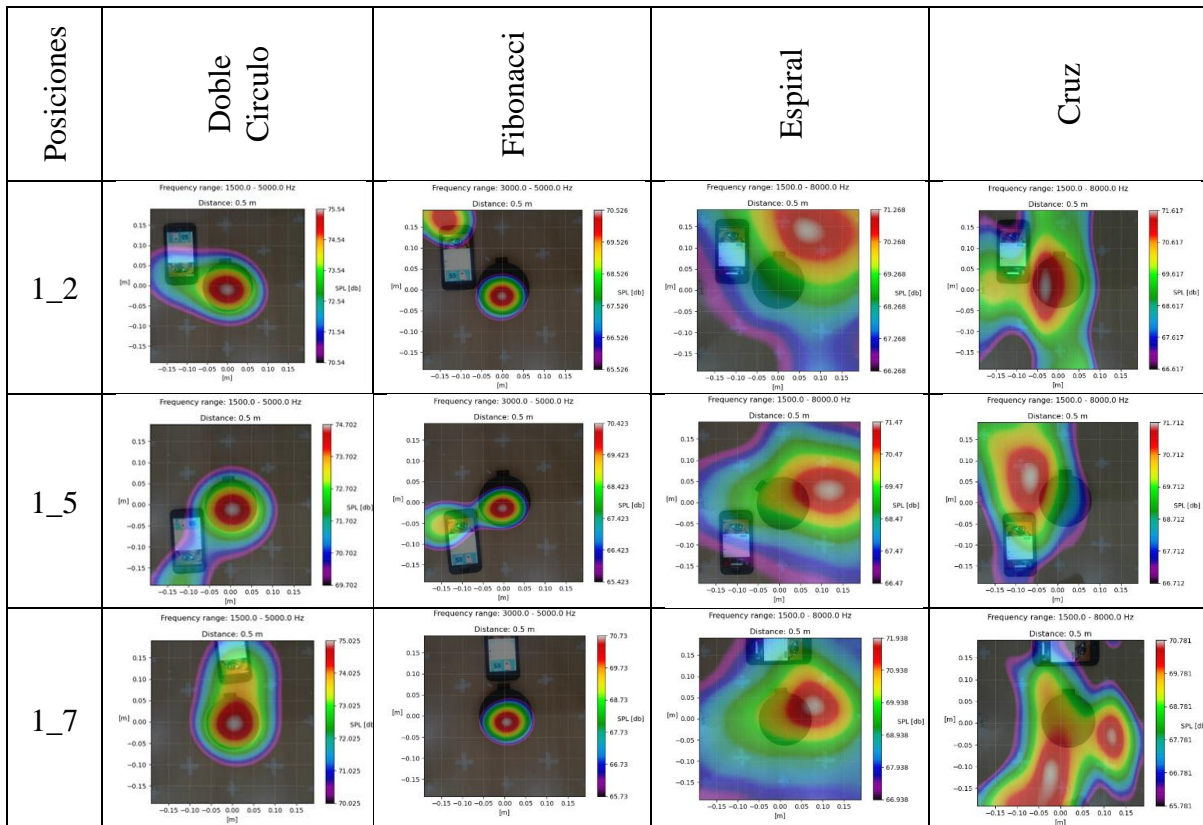
Tabla 6 Resultados segunda prueba de calibración

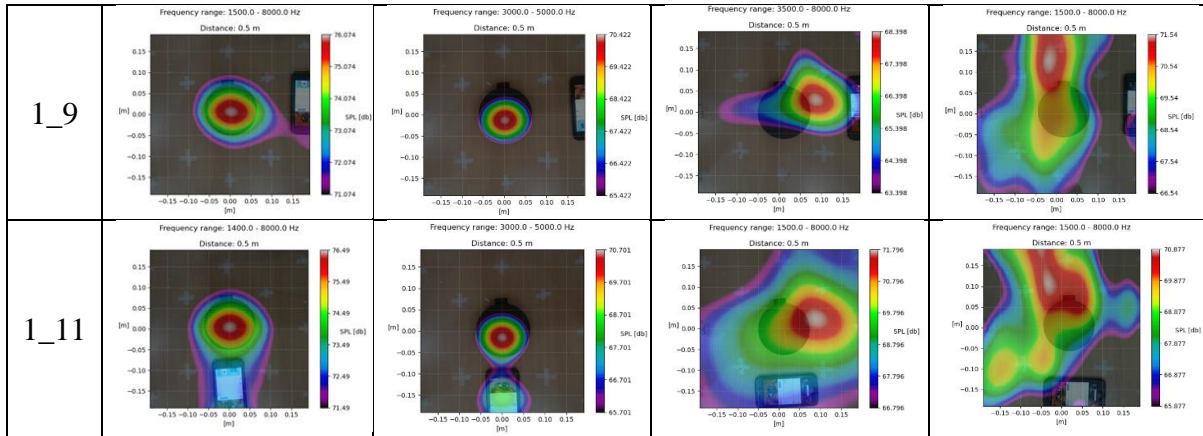
Posiciones	Doble círculo	Fibonacci	Espiral	Cruz
1	Frequency range: 5000.0 - 8500.0 Hz Distance: 0.5 m 	Frequency range: 3000.0 - 5000.0 Hz Distance: 0.5 m 	Frequency range: 3000.0 - 5000.0 Hz Distance: 0.5 m 	Frequency range: 3000.0 - 5000.0 Hz Distance: 0.5 m
2	Frequency range: 4000.0 - 5000.0 Hz Distance: 0.5 m 	Frequency range: 3000.0 - 5000.0 Hz Distance: 0.5 m 	Frequency range: 3000.0 - 5000.0 Hz Distance: 0.5 m 	Frequency range: 3000.0 - 5000.0 Hz Distance: 0.5 m
4	Frequency range: 4200.0 - 5500.0 Hz Distance: 0.5 m 	Frequency range: 3000.0 - 5000.0 Hz Distance: 0.5 m 	Frequency range: 3000.0 - 5000.0 Hz Distance: 0.5 m 	Frequency range: 3000.0 - 5000.0 Hz Distance: 0.5 m



La tercera prueba de calibración consiste en dos fuentes de sonido, un parlante inalámbrico y el parlante de un teléfono celular, a una distancia desde la webcam hasta la fuente de 0.5m a una misma frecuencia; la primera fuente de sonido se ubica en la posición 1 en tanto que la fuente de sonido 2 variará su posición entre 2, 5, 7, 9 y 11.

Tabla 7 Resultados tercera prueba de calibración





La última prueba de calibración consiste en una sola fuente de sonido, a una distancia desde la webcam hasta la fuente de 0.3m a una misma frecuencia en las posiciones 1, 2 y 4.

Tabla 8 Resultados de cuarta prueba de calibración

Posiciones	Doble Círculo	Fibonacci	Espiral	Cruz
1				
2				
4				

A partir de los resultados de calibración es evidente que los arreglos doble círculo y Fibonacci presentan mejores respuestas en todas las pruebas ejecutadas.

En la primera prueba de calibración se observa que el arreglo doble círculo elimina de manera eficiente las fuentes de interferencia a medida que el valor de frecuencia incrementa,

además de localizar la ubicación específica de la fuente de sonido; por otro lado, los arreglos espiral y cruz muestran dificultad en la localización, así señalando una fuente de sonido no deseada. El arreglo de Fibonacci localiza eficazmente la fuente con el valor más alto de frecuencia.

En cuanto a los resultados de la segunda prueba de calibración, es notable la recepción de señal de la fuente de sonido en todas las posiciones a excepción de la posición 12; en contraste, los arreglos espiral y cruz no logran eliminar las fuentes de interferencia causando problemas de localización en todas las posiciones.

Al utilizar dos fuentes de sonido en la tercera prueba, se observa problemas de ubicación en todos los arreglos. A pesar de presentar resultados satisfactorios en las pruebas previas, el arreglo doble círculo y Fibonacci no logran detectar las dos fuentes de sonido al mismo tiempo; en unos casos presentan a la fuente de sonido como un sonido no deseado mas no como una señal a analizar y en otros casos esta fuente pasa desapercibida. Finalmente en la última prueba de calibración, las respuestas del arreglo doble círculo y Fibonacci vuelven a ser satisfactorias en todas las posiciones, incluso detectan mejor la señales recibidas; este hecho puede atribuirse a la menor distancia existente entre la fuente de sonido y el diafragma de los micrófonos.

Sobre la base de estos resultados y observaciones se concluye que los arreglos Fibonacci y dobe círculo cumplen satisfactoriamente los requisitos necesarios para un monitoreo acústico de un objeto, en este caso, un motor eléctrico.

Análisis de ingeniería

El objetivo de este proyecto es el análisis de fallas internas de motores eléctricos por medio del uso del prototipo de cámara acústica. Los resultados de calibración demostraron

que el equipo responde a los requerimientos de medición para los arreglos Fibonacci y doble círculo, por lo tanto, es conveniente ejecutar el análisis del motor.

Para este análisis se utiliza tres motores eléctricos modelo D0L34HS; uno se encuentra operando normalmente, por otra lado, el par de motores restantes poseen una falla interna diferente para cada uno; es importante que los tres motores a analizar posean las mismas características debido a que la identificación de las fallas internas se realizan a partir de la comparación con los resultados del motor “sano” o nuevo.



Figura 20 Motor “sano” o nuevo



Figura 21 Motor falla 1

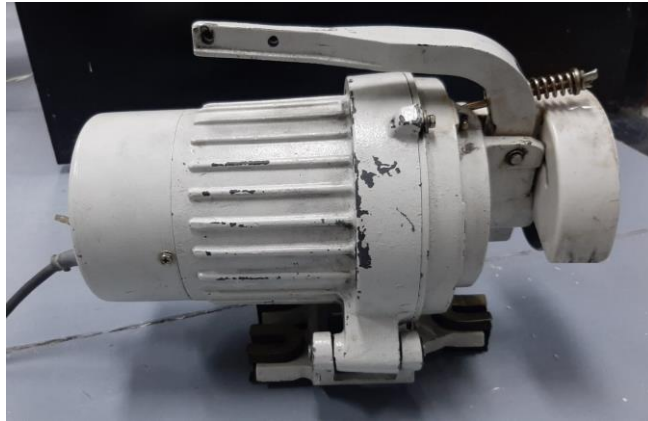


Figura 22 Motor falla 2

Tabla 9 Características de los tres motores

Modelo	D0L34HS
Voltaje [V]	110/120
Amperaje[A]	8.36/4.18
RPM	3450
Hertz[Hz]	60
Phase	1
Potencia[W]	550

Se ubica al motor en la posición 1 dentro del plano de evaluación permitido de la cámara acústica, puesto que los resultados de calibración indican mejores resultados cuando se evalúa en este parámetro; el motor se ajusta al suelo mediante pernos y una plancha metálica con el fin de reducir valores de vibraciones externas al funcionamiento del motor.

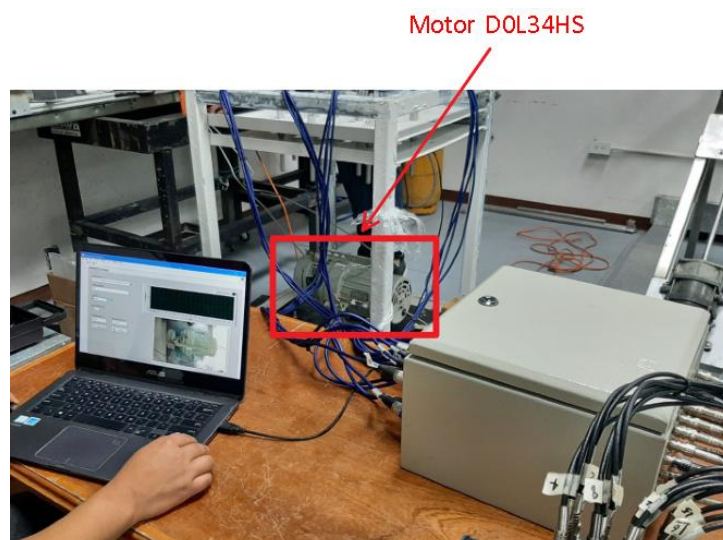


Figura 23 Análisis acústico de un motor eléctrico



Figura 24 Procesamiento de datos del motor “sano” o nuevo

Adicionalmente, se dispone de un acelerómetro modelo 356A15, cuyo objetivo es detectar las vibraciones que produce un motor; así, se pretende evaluar a los tres motores disponibles bajo las mismas condiciones que los análisis de la cámara acústica con el fin de obtener resultados comparativos en temas de detección de fallas internas respecto a la frecuencia medida.

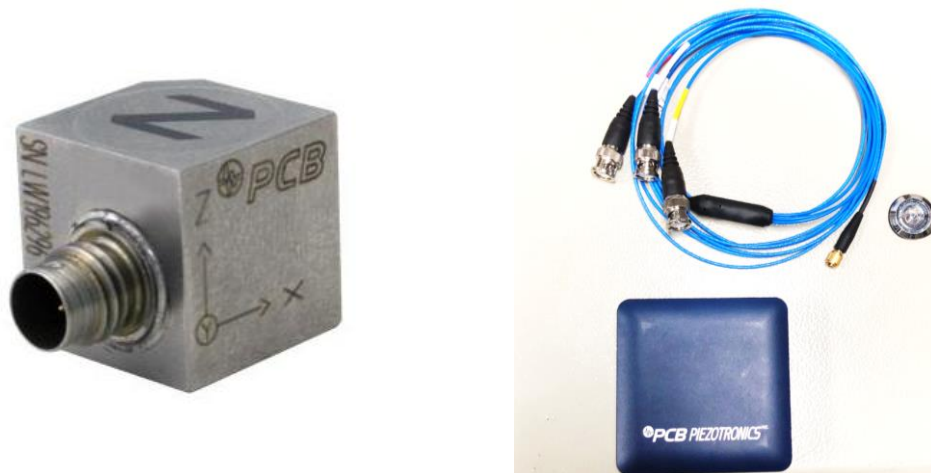


Figura 25 Acelerómetro modelo 356A15

La calibración del equipo corresponde a:

Tabla 10 Datos de calibración del acelerómetro

Model #: 356A15					
Serial #	LW227387 (x axis)	Serial #	LW227387 (y axis)	Serial #	LW227387 (z axis)
Sensitivity	97.4 mV/g	Sensitivity	103.5 mV/g	Sensitivity	102.4 mV/g
	$(9.93 \frac{mV}{m/s^2})$		$(10.55 \frac{mV}{m/s^2})$		$(10.44 \frac{mV}{m/s^2})$
Bias Level	11.0 VDC	Bias Level	10.8 VDC	Bias Level	11.0 VDC
Date:	3/16/17		By:	Joseph Rogerson	
PCB PIEZOTRONICS					

El acelerómetro piezométrico se coloca lo más cercano posible al eje y no sobre la carcasa del motor debido a que la superficie de contacto con este equipo de medición debe encontrarse lo más estático posible; bajo estas condiciones, los picos de frecuencia resultantes no se encuentren fuera del espectro deseado (Castellanos, 2015). El acelerómetro mide las vibraciones en 3 ejes diferentes (X, Y, Z), por lo cual, la ubicación del dispositivo es de suma importancia para una correcta medición.

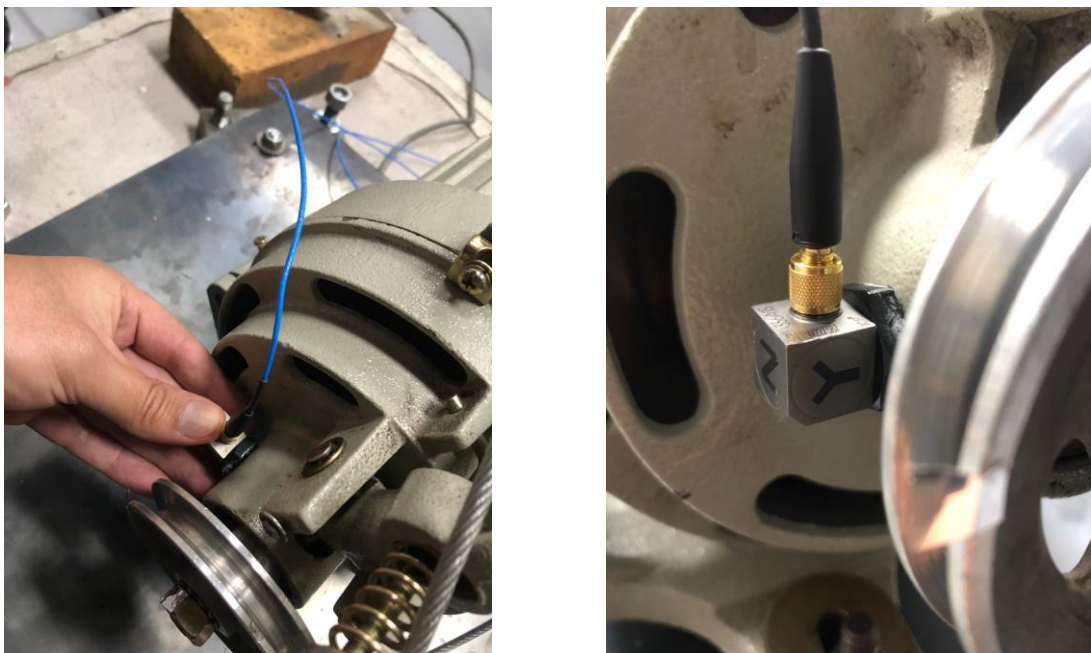


Figura 26 Ubicación del acelerómetro en el motor eléctrico

RESULTADOS

Informe de diseño

Para el diseño de la cámara acústica se contempla tres sistemas: estructura, caja de circuitos y la interfaz de monitoreo acústico. La estructura está compuesta por dos partes; la estructura principal, la cual sostiene los arreglos de micrófonos, los mismos micrófonos y las conexiones respectivas, y los arreglos de micrófonos. La estructura principal utiliza tubos de perfil cuadrado y ángulo de lados iguales de Acero Estructural (ASTM A-36).

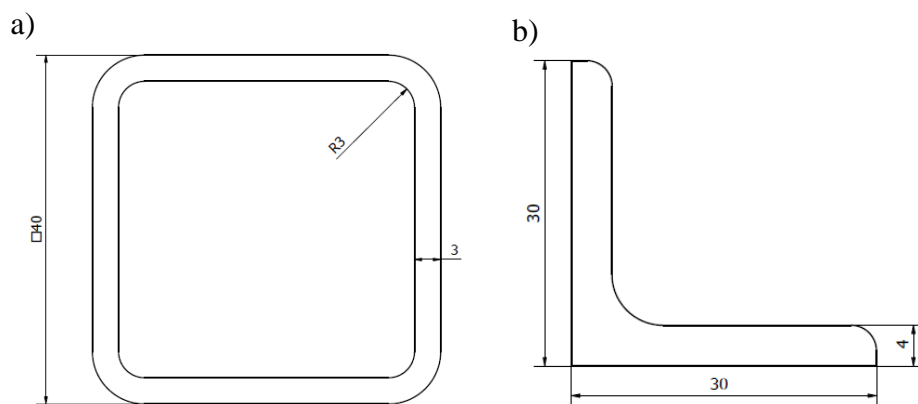


Figura 27 Dimensiones de los perfiles a) cuadrado y b) ángulo de lados iguales [mm]

Las dimensiones de la estructura principal se indican a continuación y su volumen es igual a 1067188cm^3 .

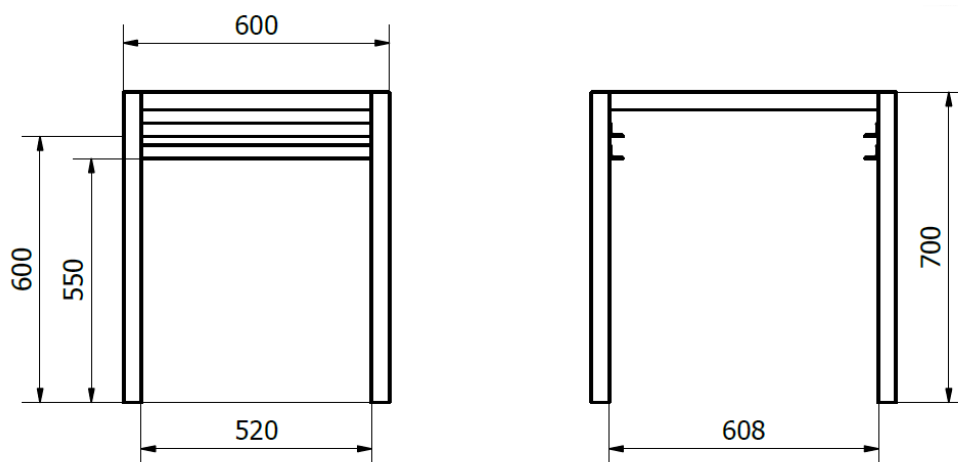


Figura 28 Dimensiones de la estructura principal [mm]

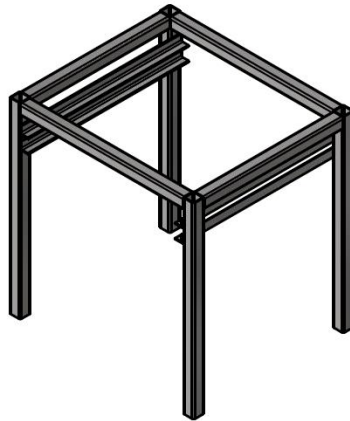


Figura 29 Estructura principal

Las dimensiones de cada plancha de arreglo de micrófonos son de $600 \times 600 \times 2 \text{ mm}$, lo que da como resultado un volumen de 1080000 mm^3 excluyendo la aberturas creadas para la ubicación de cada micrófono; se utilizan dos planchas para el funcionamiento del sistema. Las dimensiones de cada arreglo de micrófonos se especifican en el ANEXO J.

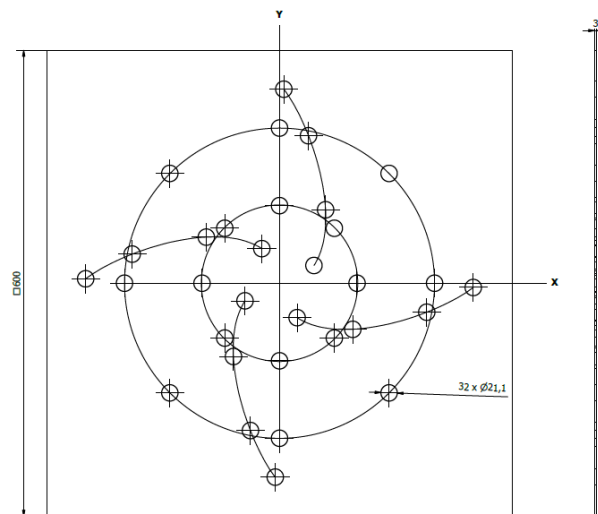


Figura 30 Dimensiones del arreglo de micrófonos (doble círculo y espiral)[mm]

Las dimensiones de cada micrófono condensador Behringer ECM-8000 es $305 \times 130 \times 85 \text{ mm}$, por lo tanto, con un volumen de 3370.25 cm^3 con una masa de 0.2 kg ; cada cable XLR tiene una masa de 0.114 kg . La masa completa a la que estará sometida la estructura principal y los dos arreglos de micrófonos será el total de 16 micrófonos y 16 cables XLR, así la masa total es de 4.149 kg . De esta manera el peso total es:

$$P_{Total} = 4.149kg \times 9.8 \frac{m}{s^2}$$

$$P_{Total} = 40.66N$$

La estructura de la cámara acústica debe ser capaz de soportar el peso de los micrófonos, así como sus respectivas conexiones, por lo tanto, la deflexión de las planchas con los arreglos de micrófonos es el aspecto más importante a considerar. De esta manera, se plantea dos tipos de simulaciones; la primera se realiza en el software MDSolids en el cual se asumió una sola viga cuadrada con magnitudes de fuerza aplicadas correspondientes al peso de un micrófono y un cable conector XLR en la ubicación específica de cada micrófono en una vista lateral. La segunda simulación se la ejecuta en el software Inventor Autodesk, el cual, al utilizar un modelo con las dimensiones y materiales seleccionados, presenta resultados más certeros y específicos.



Figura 31 Carga de micrófonos y conexiones

Simulación en MDSolids

Para las simulaciones del cálculo de deflexión, se considera las planchas metálicas como vigas con el objetivo de simplificar los cálculos. Para cada arreglo, se muestra la viga

con la ubicación que le corresponder a cada micrófono en una vista lateral y su respectivo diagrama de deflexión.

Las magnitudes de cada fuerza corresponden al peso total dividido para la cantidad de micrófonos en cada posición.

$$P_N = 2.541N$$

El valor de EI para la simulación de deflexión es igual a

$$EI = (200GPa)(4.00 \times 10^{-10} m^4)$$

$$EI = 80N \cdot m^2$$

Arreglo Cruz

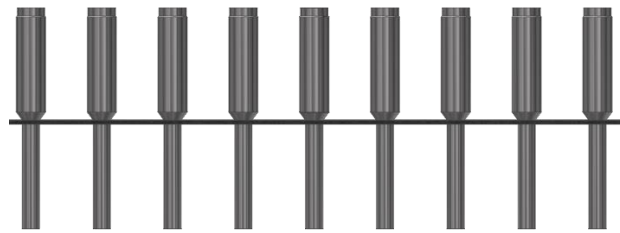


Figura 32 Vista lateral del arreglo cruz

En la vista lateral del arreglo cruz únicamente se aprecia 9 micrófonos, sin embargo, en la posición de lo que sería el micrófono 5 se ubican 8 micrófonos; la magnitud de la fuerza en esta ubicación corresponderá a $P_9 = 8P_N$.

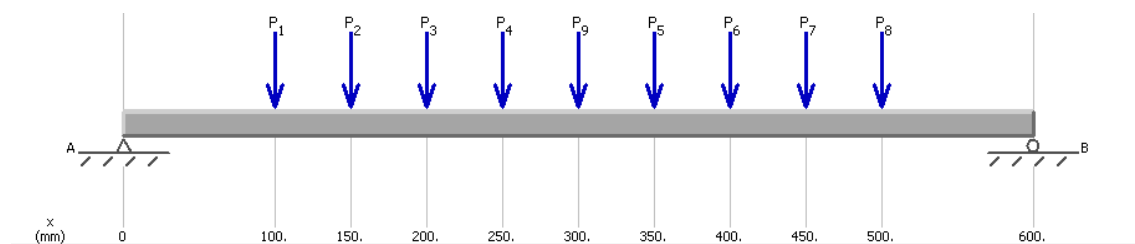


Figura 33 Diagrama de carga del arreglo cruz

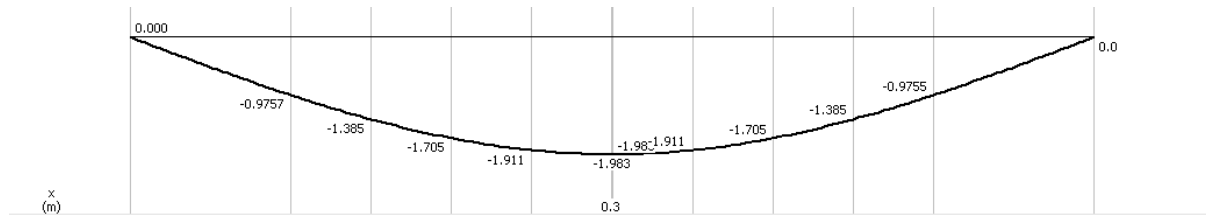


Figura 34 Diagrama de deflexión del arreglo cruz

Se presentan los cálculos detallados del resto de arreglos en el ANEXO E.

Tabla 11 Resultados de deflexión máxima en MDSolids

Arreglo	Deflexión [mm]
Doble círculo	1.892
Fibonacci	1.749
Cruz	1.983
Espiral	1.834

Simulación Inventor

Con el fin de obtener resultados más cercanos a la problemática real, se recurre al programa Inventor Autodesk; se modela la estructura, las planchas con los arreglos respectivos, y los niveladores de suelo con el fin de evaluar el comportamiento del material y diseño.



Figura 35 Modelo 3D de la cámara acústica y el arreglo cruz

Se utilizan del acero ASTM A36 para los tubos de perfiles cuadrados y de ángulo de lados iguales y las planchas metálicas; se le asigna el material Rubber para los niveladores del suelo, y, por último, se les asigna un acero *mild* a los pernos.

Tabla 12 Propiedades mecánicas de los materiales de la estructura

Material	Densidad [g/cm^3]	Yield Strength [MPa]	Ultimate Tensile Strength [MPa]	Young's Modulus [GPa]	Poisson's ratio	Shear Modulus [GPa]
Steel ASTM A36	7.85	248.225	399.9	199.959	0.3	76.9073
Rubber, Silicone	1.25	10.34	6.5	0.003	0.49	0.001
Steel, Mild	7.85	207	345	220	0.275	86.2745

Se aplican las fuerzas horizontales correspondientes al peso de un micrófono y su respectivo conector obedeciendo la ubicación de cada arreglo. En la siguiente figura se aprecia la distribución del arreglo Fibonacci y el resultado de desplazamiento. El resumen de resultados de deflexión máxima de todas las simulaciones se presentan en la tabla 13; las simulaciones de todos los arreglos se presentan en el ANEXO A.

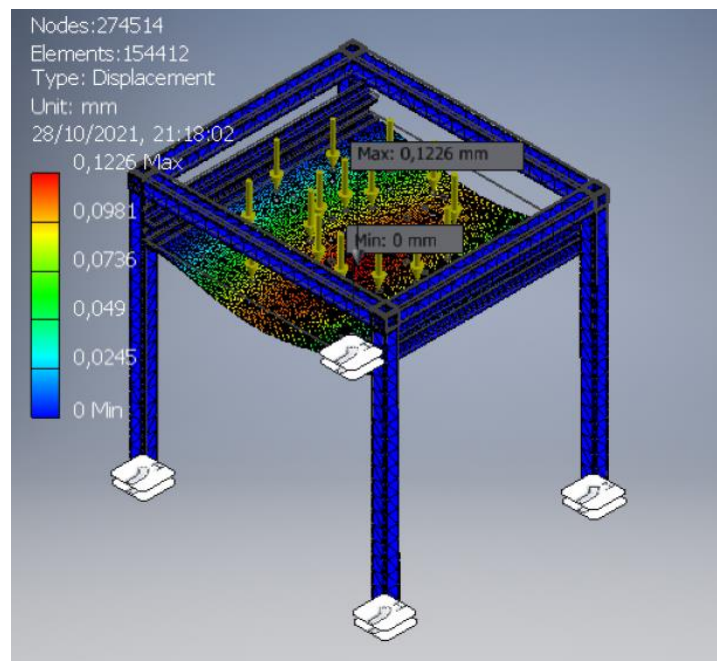


Figura 36 Resultado de deflexión del arreglo Fibonacci

Tabla 13 Desplazamientos máximos de la simulación en Inventor Autodesk

Arreglo	Desplazamiento máximo [mm]
Doble círculo	0.09648
Fibonacci	0.1226
Cruz	0.1222
Espiral	0.09648

El cálculo detallado asumiendo una viga rectangular apoyada en ambos extremos en tres casos: carga uniformemente distribuida, carga puntual a $1/2L$ de la viga y carga puntual a $3/4L$ de la viga se encuentra en el ANEXO C.

Por otra parte, se ha seleccionado el caucho como material para los niveladores de suelo de la estructura debido a sus ventajas en ligereza y resistencia, además de presentar la cualidad de absorción de ligeras vibraciones. Las dimensiones del nivelador se presentan en las siguientes figuras:

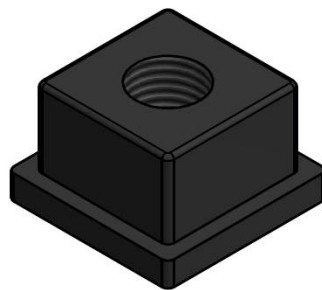


Figura 37 Nivelador de suelo

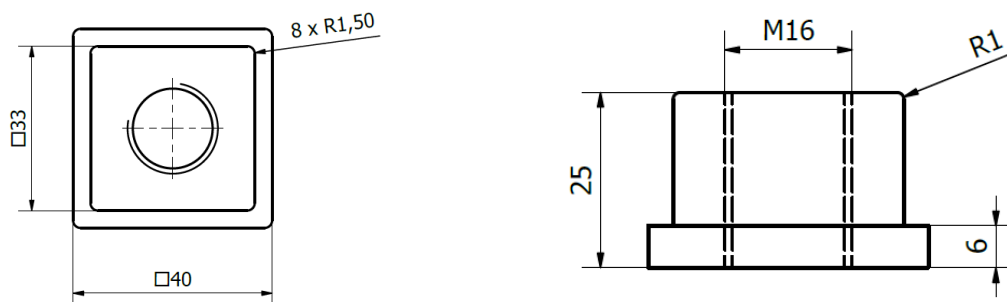


Figura 38 Dimensiones de nivelador de suelos [mm]

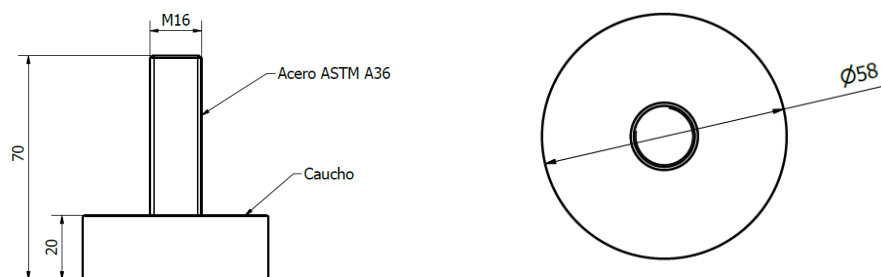


Figura 39 Dimensiones del perno de nivelador de suelo [mm]

El gabinete metálico seleccionado como protector de los circuitos y componentes eléctricos tiene las dimensiones $400 \times 300 \times 200 \text{ mm}$ con un volumen de 24000 cm^3 .



Figura 40 Gabinete metálico liviano

Este gabinete es adaptado a las puertos de entrada y salida de los 16 micrófonos, además de las conexiones de poder.

Se instala un fusible eléctrico con el fin de interrumpir la corriente si esta resulta ser excesiva y así evitar daños a los componentes eléctricos. Se realiza el siguiente cálculo:

P: Potencia requerida por cada micrófono

R_m: Impedancia del micrófono 200 Ω

V_m: Phantom power del micrófono (+15 to +48 V)

V: Voltaje de alimentación 12 V

I: Corriente requerida del fusible

$$P = \frac{V_m^2}{R_m}$$

$$P = \frac{15^2}{200} = 1.125 \text{ W}$$

$$I = \frac{P}{V} = \frac{1.125 \text{ W}}{12 \text{ V}} = 0.09475$$

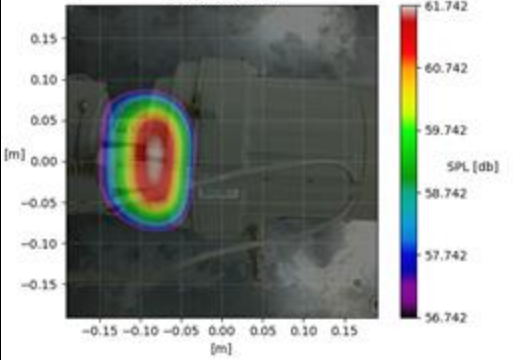
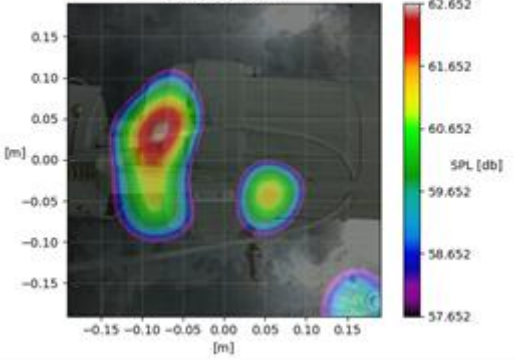
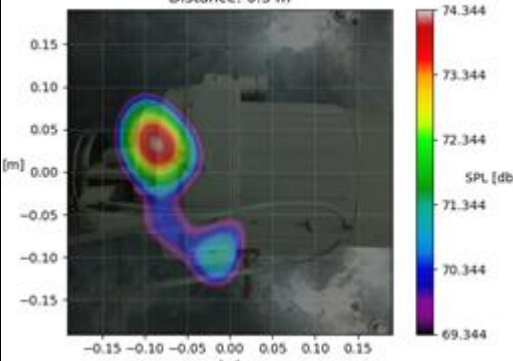
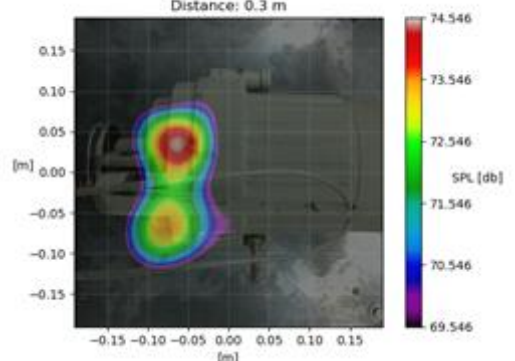
$$I = 94.75 \text{ [mA]}$$

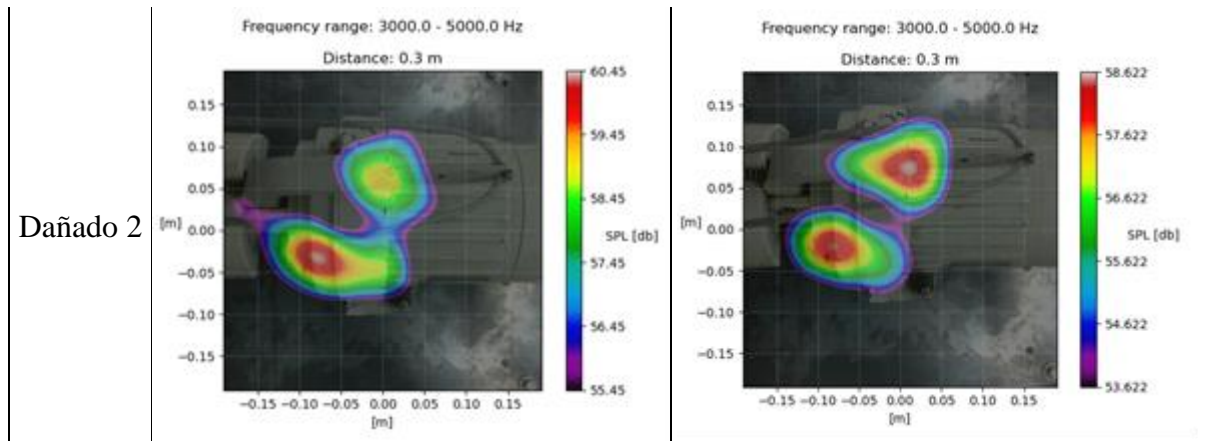
Al escoger el fusible comercial, se requiere comprar un fusible europeo de 0.1 [A], para cumplir con las especificaciones requeridas del micrófono.

Análisis de ingeniería

A partir de los resultados de calibración, certificando el funcionamiento del equipo con los arreglos Fibonacci y doble círculo, es posible comenzar con las pruebas a los motores eléctricos cuyos resultados de monitoreo acústico se detallan en la siguiente tabla:

Tabla 14 Resultados de ubicación de sonido para los tres motores

Motor	Doble Círculo	Fibonacci
Nuevo	<p>Frequency range: 3000.0 - 5000.0 Hz Distance: 0.3 m</p> 	<p>Frequency range: 3000.0 - 5000.0 Hz Distance: 0.3 m</p> 
Dañado 1	<p>Frequency range: 3000.0 - 5000.0 Hz Distance: 0.3 m</p> 	<p>Frequency range: 3000.0 - 5000.0 Hz Distance: 0.3 m</p> 



Adicionalmente se presentan los resultados de frecuencia medidos por los equipos cámara acústica (arreglo Fibonacci y doble círculo) y acelerómetro para cada motor.

Motor nuevo

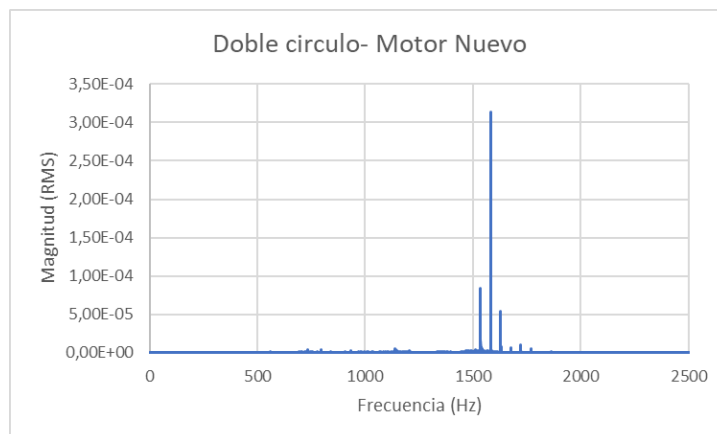


Figura 41 Frecuencia del motor nuevo con la cámara acústica (arreglo doble círculo)

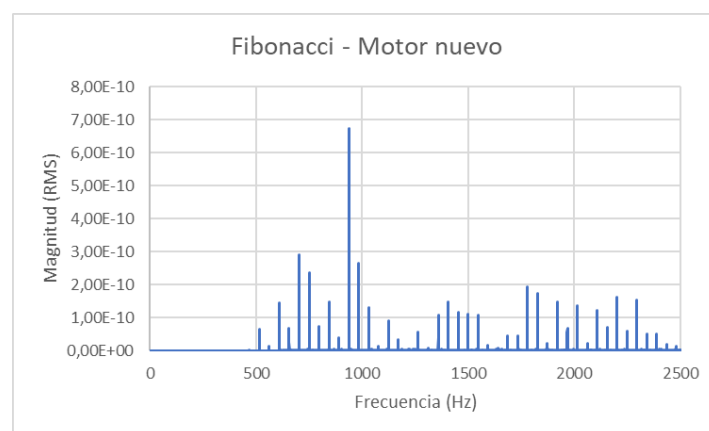


Figura 42 Frecuencia del motor nuevo con la cámara acústica (arreglo Fibonacci)

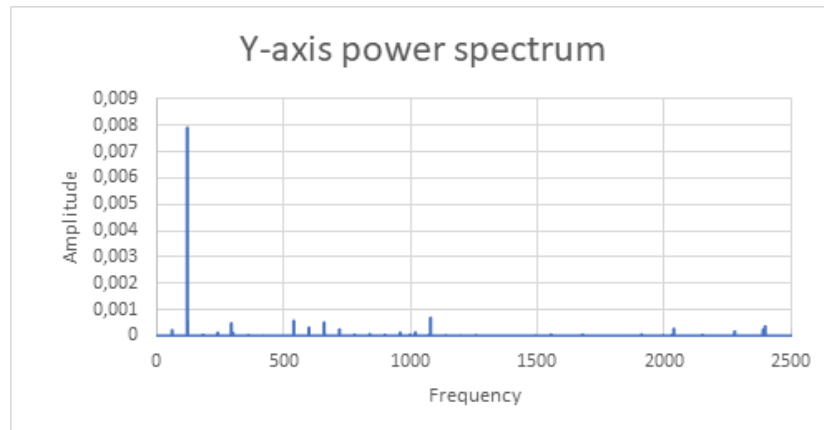


Figura 43 Espectro de vibración del acelerómetro para el motor nuevo

Motor dañado 1

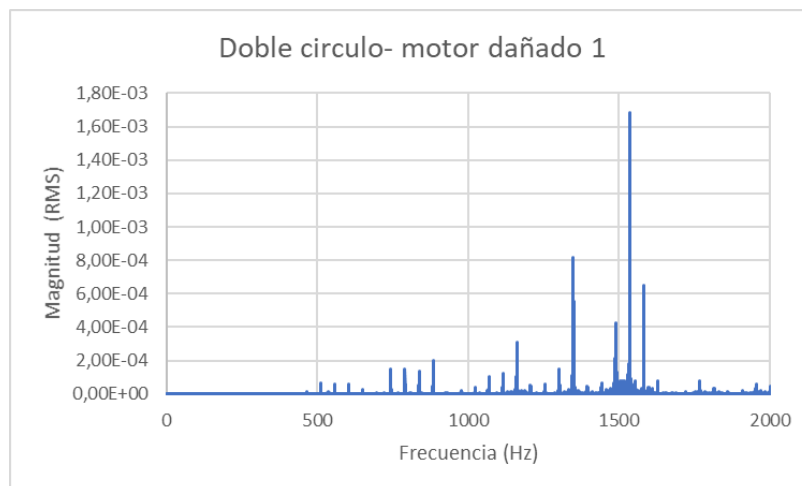


Figura 44 Frecuencia del motor dañado 1 con la cámara acústica (arreglo doble círculo)

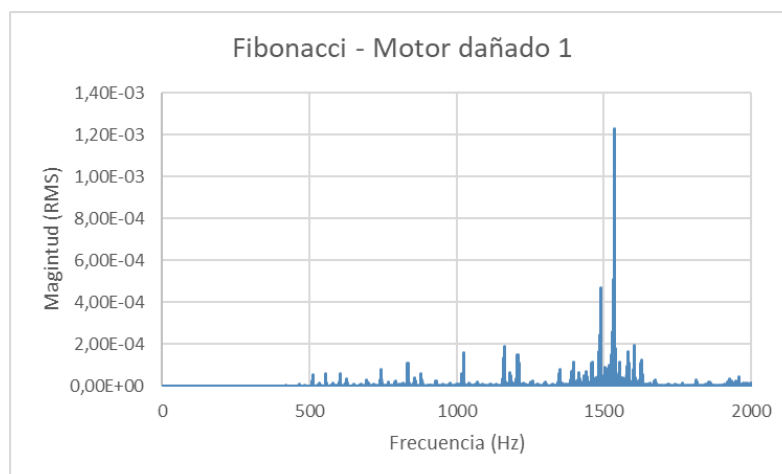


Figura 45 Frecuencia del motor dañado 1 con la cámara acústica (arreglo Fibonacci)

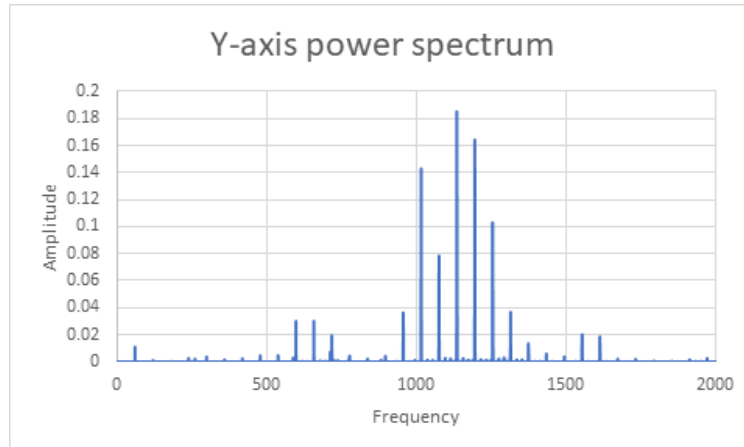


Figura 46 Espectro de vibración del acelerómetro para el motor dañado 1

Motor dañado 2

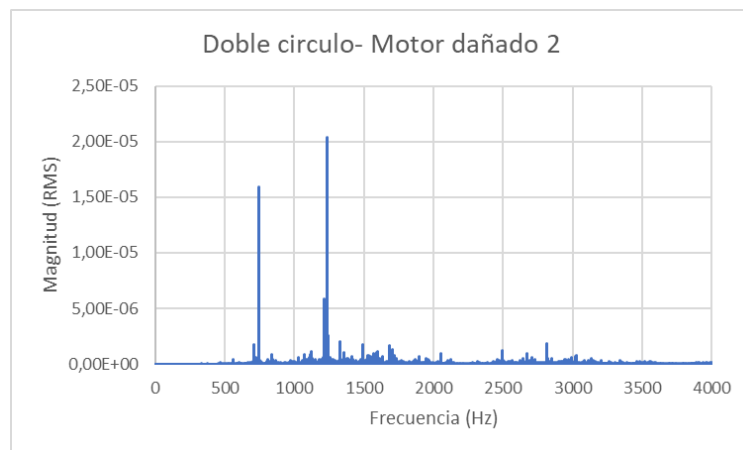


Figura 47 Frecuencia del motor dañado 2 con la cámara acústica (arreglo doble círculo)

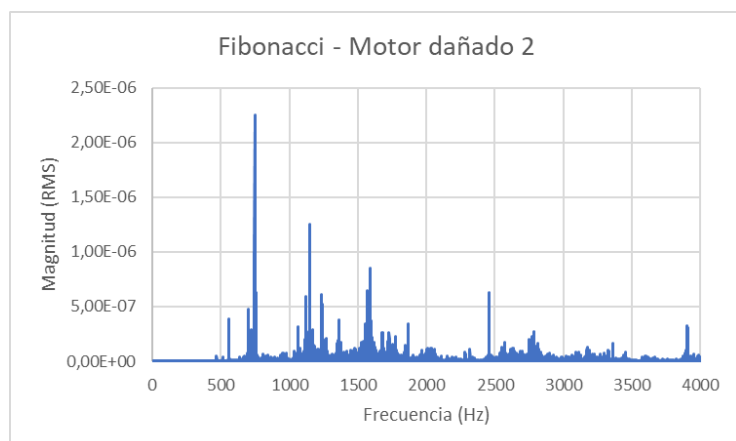


Figura 48 Frecuencia del motor dañado 2 con la cámara acústica (arreglo Fibonacci)

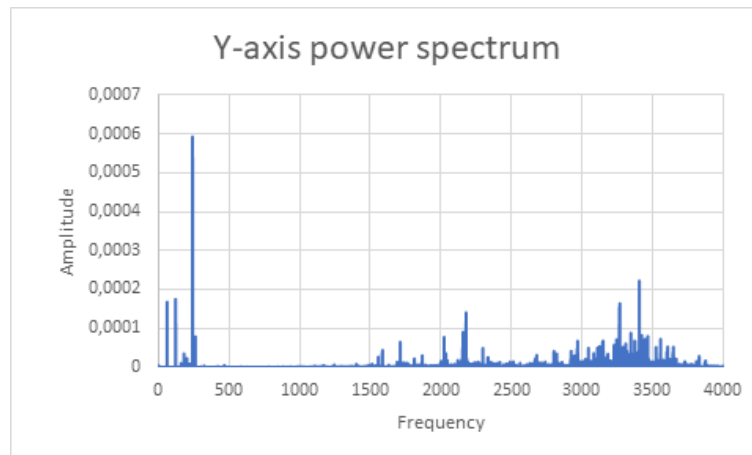


Figura 49 Espectro de vibración del acelerómetro para el motor dañado 2

La cámara acústica, por sus componentes, no presenta valores con la misma precisión que el acelerómetro piezométrico; este hecho se evidencia en el desplazamiento de las frecuencias obtenidas. Con el fin de equiparar los resultados de la cámara acústica con el acelerómetro, se realiza un factor de corrección.

Las curvas a continuación, indican el desplazamiento y su correspondiente corrección para el arreglo doble círculo y Fibonacci.

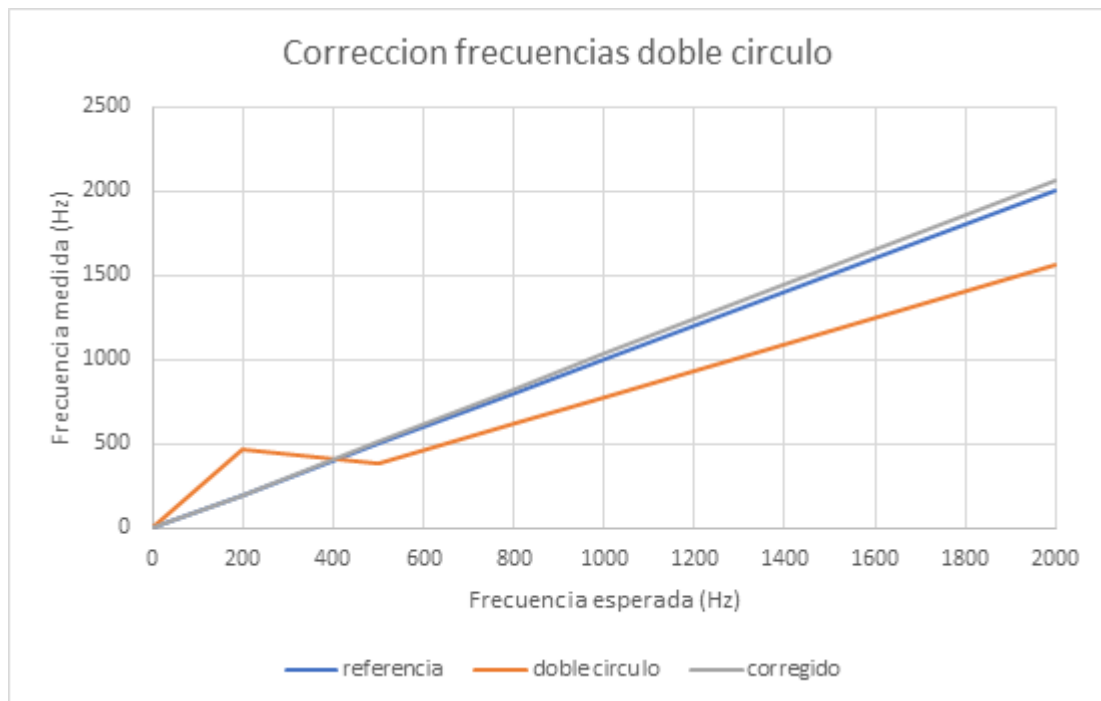


Figura 50 Factor de corrección de la frecuencia estimada vs frecuencia medida en el arreglo doble círculo

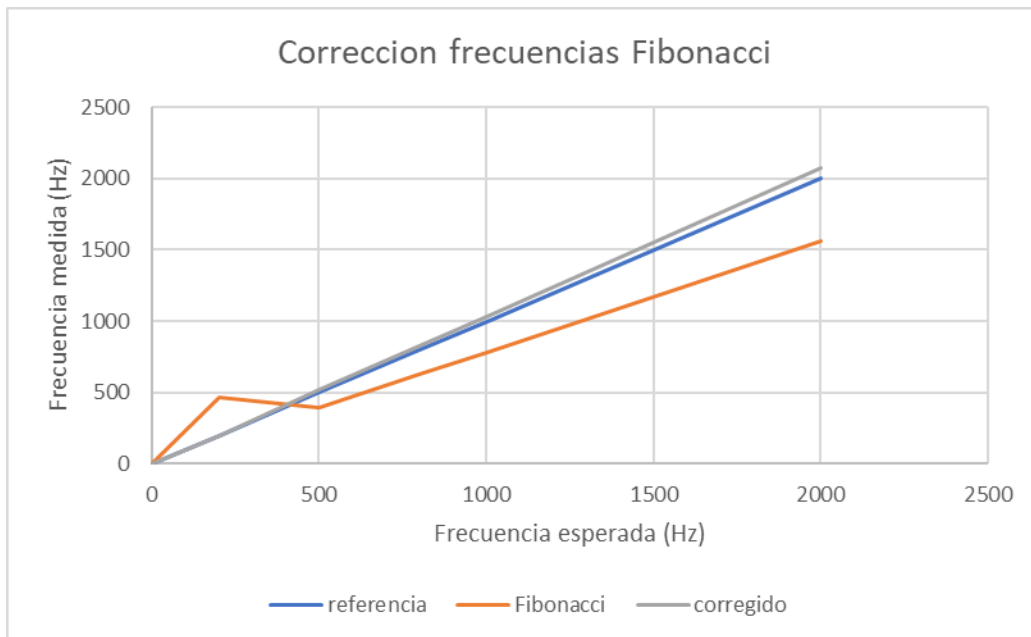


Figura 51 Factor de corrección de la frecuencia estimada vs frecuencia medida en el arreglo doble círculo

Para determinar el factor de corrección de las frecuencias obtenidas por LabView, es necesario analizar en base a un frecuencia de referencia. Al analizar las dos curvas, se identifica una variación, la cual se corrige con la siguiente ecuación.

$$\text{Factor de corrección} = f.\text{referencia} - \cos(38) * f.\text{medida}$$

A partir esta ecuación, es posible obtener los nuevos puntos para la curva corregida.

$$\text{Curva corregida} = (f.\text{referencia} - \cos(38) * f.\text{medida}) + f.\text{medida}$$

Los nuevos valores de frecuencia para cada motor empleando los arreglos doble círculo y Fibonacci se presentan en las siguientes figuras.

Motor nuevo

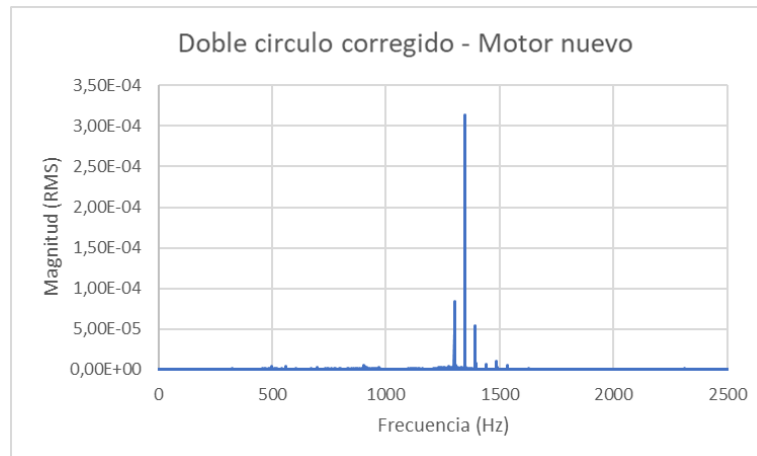


Figura 52 Frecuencia corregida del motor nuevo (arreglo doble círculo)

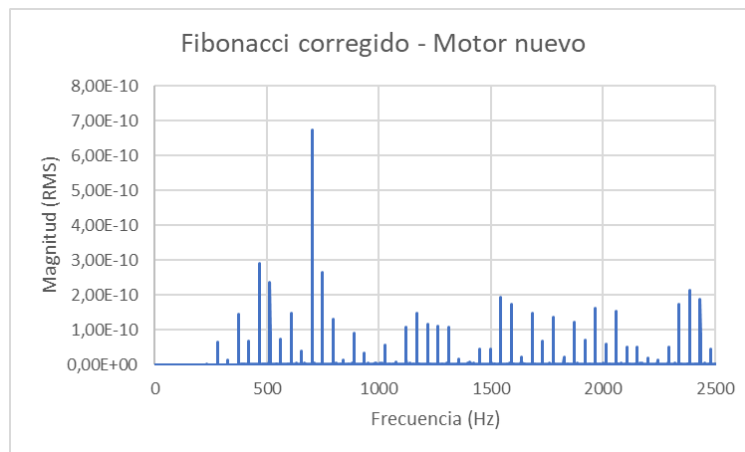


Figura 53 Frecuencia corregida del motor nuevo (arreglo Fibonacci)

Motor dañado 1

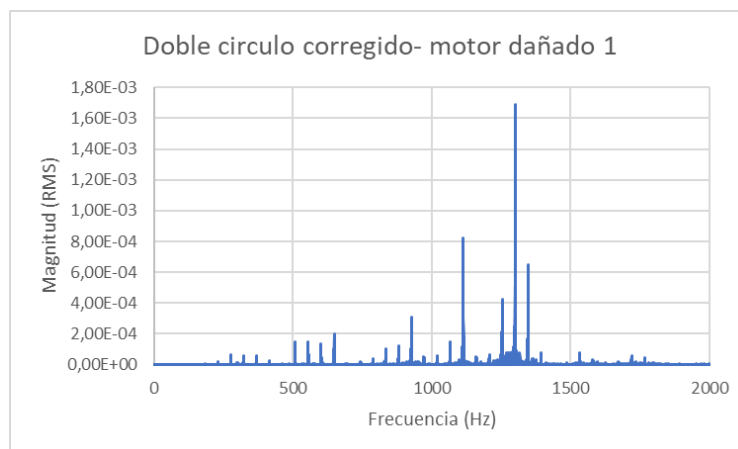


Figura 54 Frecuencia corregida del motor dañado 1 (arreglo doble círculo)

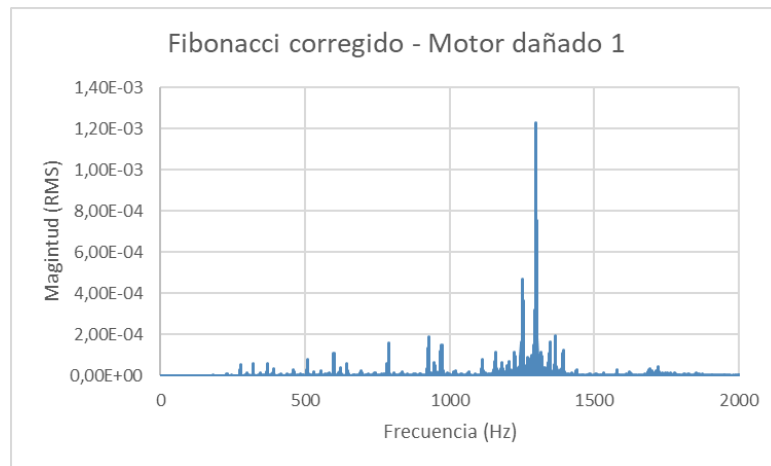


Figura 55 Frecuencia corregida del motor dañado 1 (arreglo Fibonacci)

Motor dañado 2

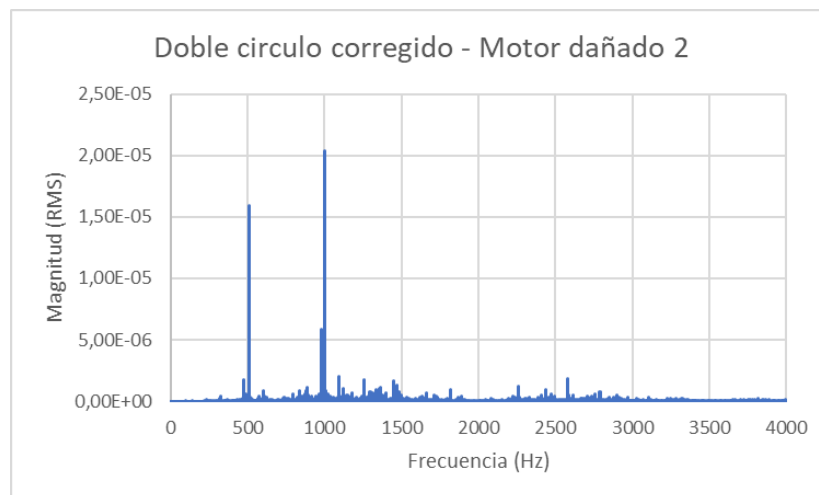


Figura 56 Frecuencia corregida del motor dañado 2 (arreglo doble círculo)

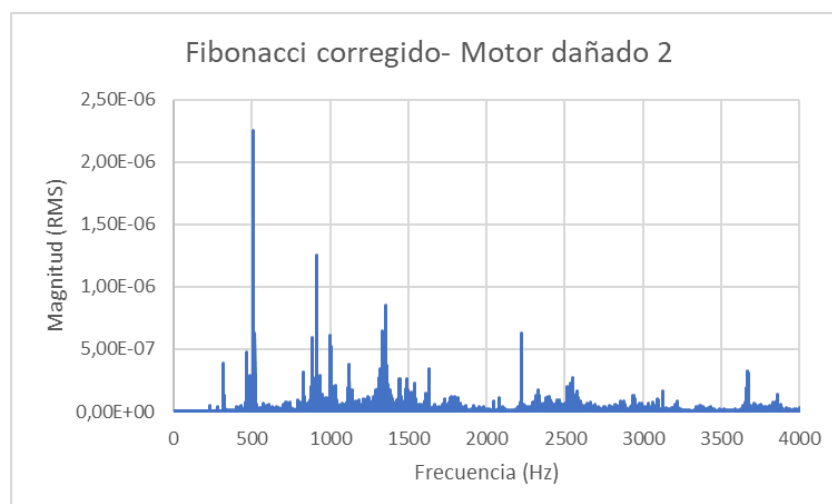


Figura 57 Frecuencia corregida del motor dañado 2 (arreglo Fibonacci)

Discusión

Estructura

A partir de los resultados de la tabla 16 se observa que el arreglo cruz presenta mayor deflexión con un valor de 1.983mm en la simulación de MDSolids. Por otro lado, los resultados de la simulación en Inventor indica que el mayor valor de desplazamiento es 0.1226mm correspondiente al arreglo de Fibonacci. Es importante resaltar las condiciones en las que se realizó cada simulación y, por lo tanto, comprender los valores superiores a 1mm de la simulación en MDSolids; las condiciones y parámetros utilizados en este último son limitados al considerar la plancha de 600x600x3mm como una viga cuadrada. Sin embargo, estos valores de deflexión siguen sin significar un problema en temas de pandeo.

Tabla 15 Resumen resultados de deflexión

Arreglo	MDSolids [mm]	Inventor Autodesk [mm]
Doble círculo	1.892	0.09648
Fibonacci	1.749	0.1226
Cruz	1.983	0.1222
Espiral	1.834	0.09648

Arreglo de micrófonos

La validación y posterior selección de arreglos o matriz de micrófonos se basa en las simulaciones realizadas en Python, sin embargo, al realizar las pruebas de calibración los resultados cambian; las fuentes de sonido generadas en Python se encuentran en posiciones fijas, por lo cual, el programa las reconoce y las ubica con exactitud. En las pruebas de calibración realizadas con un parlante como fuente de sonido en diferentes posiciones, la recepción que se obtuvo en la simulación varía; este hecho puede atribuirse a varios factores externos de laboratorio. En particular, el arreglo cruz tiene una mala recepción y un parámetro F bajo, esto debido al que los microfonos únicamente están ubicados en el eje X y Y, lo cual no permite localizar adecuadamente el sonido en puntos fuera de este rango.

Análisis de motor

La ejecución de pruebas en los motores con dos arreglos se debe a la precisión de la ubicación de la fuente de sonido que presentaron en las pruebas de calibración. Los arreglos doble círculo y Fibonacci presentan resultados satisfactorios a pesar de la variación de parámetros de frecuencia, distancia de la fuente de sonido y ubicación; únicamente presentó problemas al someterse a una prueba con dos fuentes de sonido. Sin embargo, estos dos arreglos sobresalen sobre los otros dos arreglos, los cuales presentaron desplazamientos y poca precisión, por lo cual realizar las pruebas a los motores eléctricos con estos presentaría un problema en temas de ubicación.

A partir de las gráficas de frecuencias de la cámara acústica, no es posible generar un análisis de amplitudes, puesto a que el acelerómetro presenta amplitud en aceleración, mientras que la cámara acústica en desplazamiento; sin embargo, en el análisis de frecuencias, los picos que se presentan en las gráficas medidas por la cámara acústica y el acelerómetro deben coincidir. El análisis de las frecuencias nos permite verificar que ambos equipos están calibrados y permiten identificar el mismo tipo de falla que pueda existir en un motor eléctrico.

El factor de corrección permite evitar un desfase de 300 Hz aproximadamente.

Seguridad a través del diseño

Uno de los puntos más importantes a considerar para realizar un proyecto de cualquier tipo es la seguridad de las personas, tanto el fabricante como el operador. Los riesgos existen de cualquier tipo, es por esto que a continuación se mencionan los más importantes a considerar en el diseño de la cámara acústica de manera que puedan ser gestionados de la mejor manera posible.

A continuación se muestra un ejemplo con una tabla explicativa para el análisis de riesgo:

Impacto	5					
	4					
	3					
	2					
	1	1				
		1	2	3	4	5
		Probabilidad				

Figura 58 Análisi cuantitativo

La tabla anterior compara tanto la probabilidad de que suceda un accidente con el impacto que este pudiese causar. Cabe mencionar que solo se mostraran los resultados con un alto índice de riesgo; los resultados completos se encuentran en el ANEXO H.

Riesgo: Fallo del software Labview por actualizaciones, no reconocimiento de subprogramas y mala conexión con los micrófonos.

Probabilidad: 16

La falta del software Labview causa un gran impase al momento de hacer evaluaciones con la cámara acústica ya que es la herramienta principal de visualización de los datos que arrojan la cámara y el arreglo de micrófonos. No tener el software con las correspondientes actualizaciones solamente ejecutaría errores en el programa y no se podrían analizar los resultados. Tanto el programa como una buena conexión de los micrófonos es necesaria, es por esto que si los micrófonos se encuentran mal conectados, no existirían respuestas legibles en el programa.

Riesgo: Cantidad de micrófonos disponibles para el arreglo de la cámara acústica.

Probabilidad: 15

La cantidad de micrófonos influye drásticamente en el uso de cámaras acústicas ya que mientras más alto sea el número de micrófonos, se obtendrán mejores resultados. Es por esto que un número bajo de micrófonos no arroja un análisis cien por ciento confiable que pueda detectar fallas acústicas. Con esto mencionado, es posible mencionar la necesidad de un número mínimo de dieciséis micrófonos o más para un correcto análisis.

Manual de mantenimiento y operación

Operación

Descripción general y componentes

La cámara acústica es un equipo que permite identificar fuentes de sonido a partir del procesamiento de una señal sonora. Es necesario tener en cuenta aspectos de instalación, operación y formas de medir los resultados de manera que el artefacto funcione correctamente y cumpla con los objetivos del operador.



Figura 59 Cámara acústica

Se compone de los siguientes elementos:

Tabla 16 Cantidad de componentes

Componente	Cantidad
Micrófonos condensadores Behringer ECM-8000	16
Cables XLR (azul)	16
Cables BNC (negro)	16
Fuentes de poder	3
NI cDAQ 9178 chasis	1
Ni 9234 dataset	4
Estructura de Cámara Acústica	1
Planchas con arreglos	4
Cámara web digital	1
Caja con circuitos	1
Pernos cámara	4
Pernos ¼’’ diámetro y 4’ largo	4
Tornillo cámara	4
Tornillo ¼’’	4

Instalación programas para la cámara acústica:



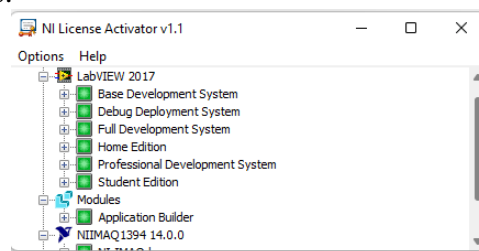
- 1) Instalar Python.
 - a) Anaconda con Python 3 Support (<https://www.anaconda.com/products/individual>)
- 2) Instalar librería Acoular.
 - a) <http://www.acoular.org/>
 - b) Nota: leer las secciones **instalación** para verificar que la instalación sea correcta.



- 3) Descargar la carpeta con el programa LabView.
 - a) https://drive.google.com/file/d/1f0ta16s_hXl4AfWJfx2E_IHg1bpLfRXV/view
 - b) Descomprimir la carpeta e instalar el programa.
 - c) En la sección de licencia poner siguiente.
 - d) En la carpeta Licencia.

 LabView 2017.Win64.English	20/9/2021 22:00	Carpeta de archivos
 NI License Activator 1.1 LabVIEW2017 x64...	20/9/2021 22:00	Carpeta de archivos

- e) Activar las licencias.



- f) Nota: desmarcar la opción de VI Package Manager 2017. Instalar la última versión directamente desde su sitio web.



- 4) Instalar VI Package Manager (VIPM)
- <https://www.vipm.io/download/>
 - Nota: después de instalar, presionar “actualización” para actualizar el repositorio de paquetes para que VIPM funcione correctamente.

Extensiones para instalar en el VIPM

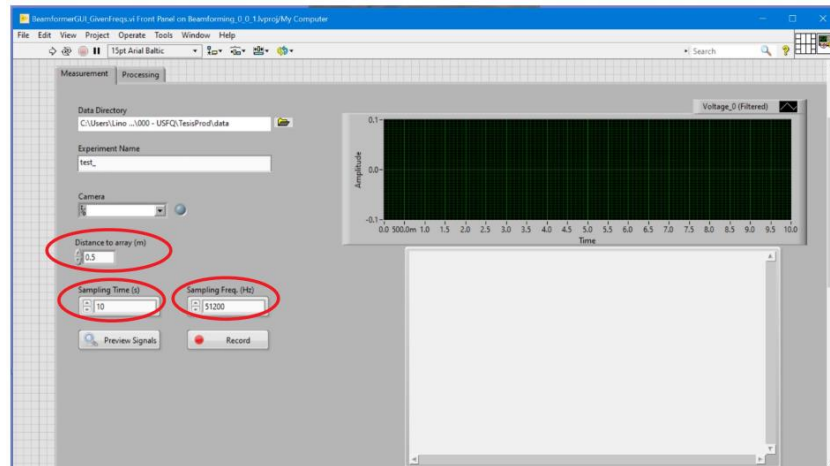
- OpenG Libraries
 - https://www.vipm.io/package/openg.org_lib_openg_toolkit/
- LiveHDF by UPVI (documentación).
 - <https://www.vipm.io/package/lvhdf5/>
- Instalar VAS
 - Interfaz de LabView para la cámara web.
 - <https://www.ni.com/es-cr/support/downloads/drivers/download.vision-acquisition-software.html#367318>
- Instalar NI DAQmx
 - Para la adquisición y reconocimiento de datos por los micrófonos.
 - <https://www.ni.com/es-cr/support/downloads/drivers/download.ni-daqmx.html#348669>
- Instalar HDFView
 - Para la inspección de archivos HDF5 de los audios grabados y sus metadatos.
 - <https://www.hdfgroup.org/downloads/hdfview/>

Pasos para operar el equipo

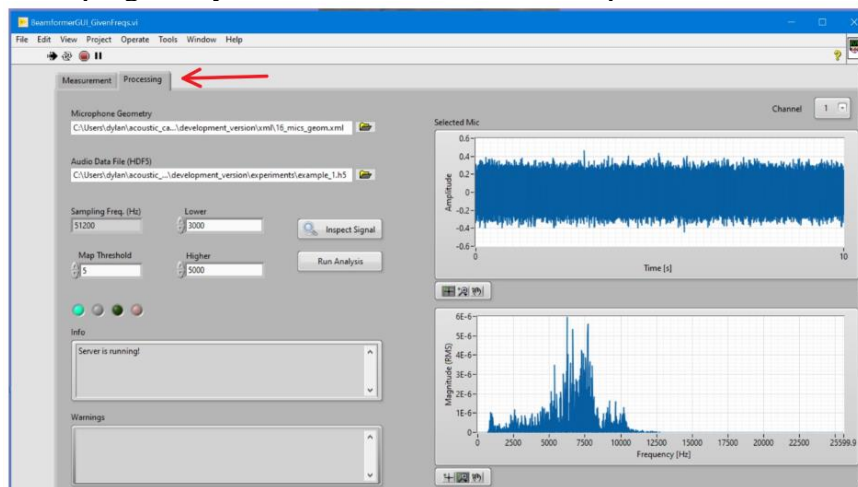
- Instalar correctamente las planchas. Las planchas con el diámetro mayor se ubican en la parte superior y las planchas con el diámetro menor en la parte inferior.
- Instalar la cámara en la plancha inferior con dirección hacia abajo para permitir una imagen clara.
- Colocar los micrófonos en orden de secuencia.
- Conectar los cables a los micrófonos en un extremo y por el otro a la caja de circuitos.
- Conectar desde la salida de la caja de circuitos cada micrófono al cDAQ.
- Por medio del cable USB, conectar el cDAQ a la computadora.
- Por medio del cable USB, conectar la cámara a la computadora.
- Ejecutar el software LabView sin conexión de internet.



- Comprobar la señal digital de cada micrófono en el proyecto de LabView (Beamforming)
- Completar la información técnica requerida. Los parámetros importantes son; Sampling Freq, Sampling Time, Distance to array, Frequency range.



11) Ejecutar el programa y observar los resultados en la pestaña de Processing.

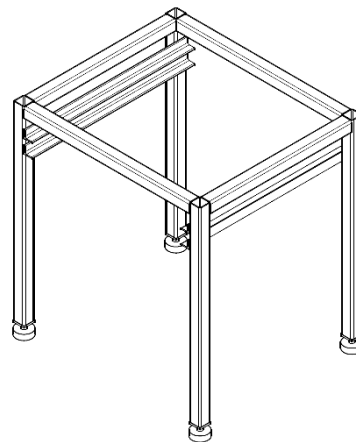


Ensamble

Estructura

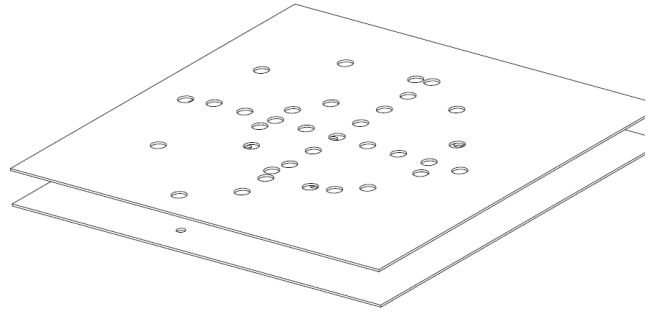
1

Asegurar la estructura en una superficie plana y asegurar su estabilidad con los pernos de nivelación.



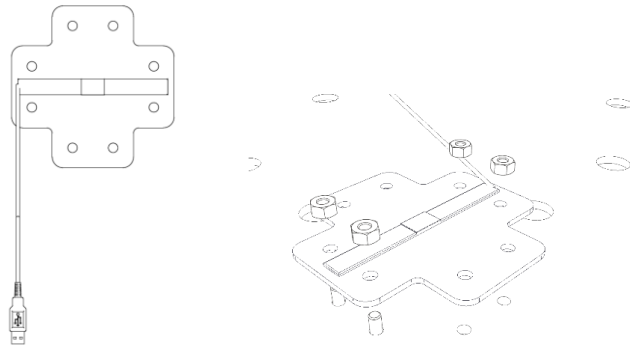
2

Asegurar la estructura en una superficie plana y asegurar su estabilidad con los pernos de nivelación.
 Seleccionar el tipo de arreglo a utilizar e identificar la plancha con los diámetros más pequeños.



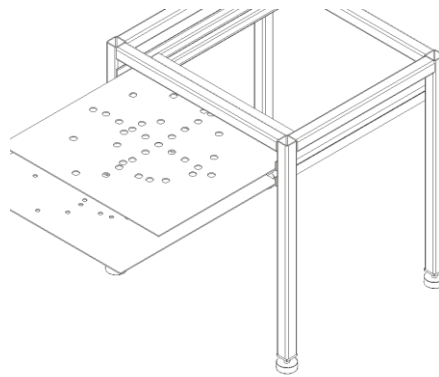
3

Asegurar la cámara en la plancha de arreglos con el diámetro más pequeño.



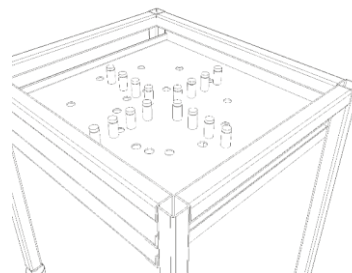
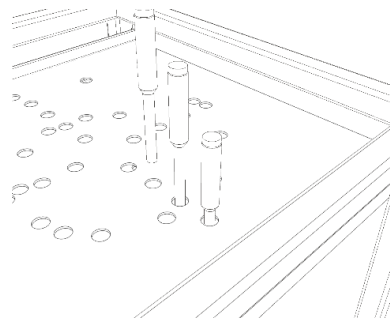
4

Colocar las planchas de arreglos.
 La plancha con el diámetro menor se coloca en la parte inferior con la cámara en dirección al suelo.



5

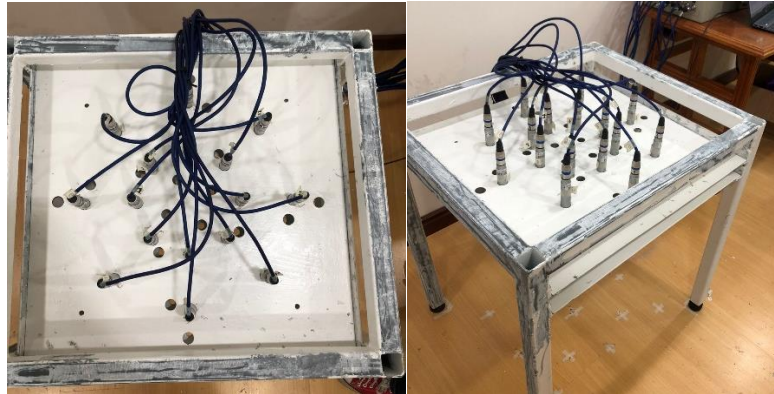
Colocar los micrófonos de acuerdo al arreglo seleccionado.



Conexión eléctrica

1

Conectar los cables XLR (azul) a cada micrófono.



2

Conectar los cables XLR (azul) a las conexiones de entrada en la caja de circuitos; se conecta siguiendo el orden de izquierda a derecha:

Fila superior: micrófono 1-8.

Fila inferior: 9-16.

Asegurarse de que los *switch ON/OFF* se encuentren encendidos.



3

Conectar los cables BNC (negro) a cada conexión de salida de la caja de circuitos.



4

Conectar los cables BNC (negro) al cDAQ 9178.



5

Conectar las fuentes de poder.



Diagrama de circuitos

El circuito representa a un puerto de entrada y salida de un micrófono en la que cada señal es alimentada a 12 V. El esquema inicia con una entrada XSL en la parte superior donde conlleva un sistema de diodos (D), resistores (R), Borneras, Switch (J) de manera que pueda controlar un circuito integrado TL081.

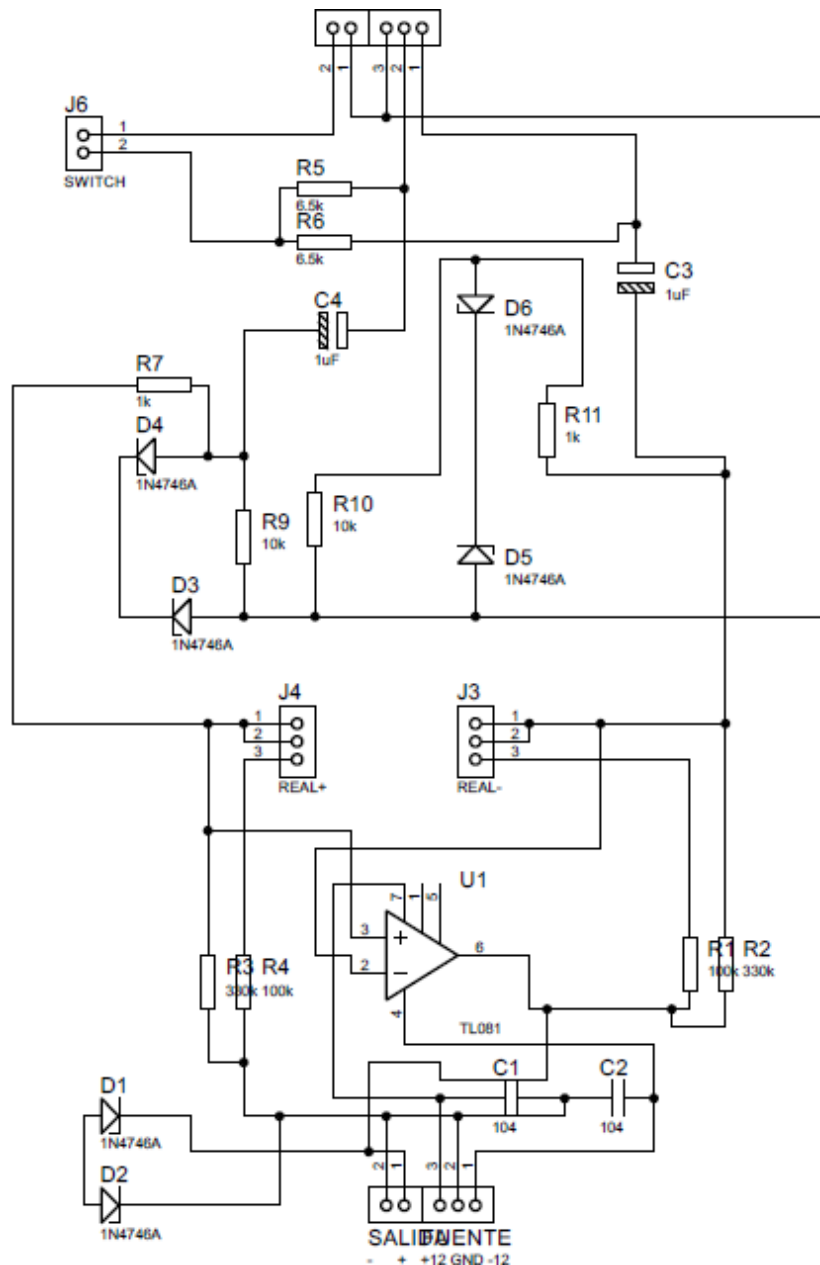


Figura 60 Esquema de la caja de circuitos

Recomendaciones de seguridad

- Almacenar los micrófonos dentro de sus respectivos compartimentos para evitar daños graves cuando no están en uso.
- Desconectar cuidadosamente los cables correspondientes a las salidas de los micrófonos y a las salidas del cDAQ.
- Utilizar un regulador de voltaje para evitar daños en la caja de circuitos.

- Mantener el cDAQ y la caja de circuitos en una superficie plana y elevada como una mesa.
- No forzar la instalación de los micrófonos en la plancha de arreglos para evitar pérdidas de alineación de los mismos.

Mantenimiento

Programa de mantenimiento

1. Inspección de condiciones ambientales.

Evaluar las condiciones del ambiente en las que se ha almacenado el equipo y evaluar aspectos como la exposición a humedad o la presencia de polvo.

2. Limpieza integral externa de la estructura y las planchas con arreglos.

Verificar y eliminar vestigios de suciedad como polvo mediante métodos que utilicen limpiadores de superficies líquidas.

3. Limpieza integral interna de la caja de circuitos.

Eliminar cualquier vestigio de suciedad en las partes internas de la caja de circuitos utilizando limpiadores de contactos eléctricos, aspirador, brocha, etc.

4. Revisión de seguridad eléctrica.

Examinar o reconocer los componentes eléctricos para determinar falta o deterioros de los cables internos, conectores, etc. Inspeccionar las tarjetas de circuitos de manera visual y táctil si es necesario sobre un posible sobrecalentamiento.

5. Lubricación y engrase de los pernos de nivelación de suelo.

Engrasar y/o lubricar los pernos de nivelación de suelo.

6. Ajuste y calibración

Asegurar que el equipo este nivelado. Luego debe realizarse la calibración de cada micrófono para asegurarse que funcionan correctamente, y posteriormente realizar una calibración de todos los micrófonos.

Conclusiones

La cámara acústica es un dispositivo capaz de detectar una gran variedad de fuentes de sonido y caracterizarlas en frecuencias y espectros; dichos aspectos convierte a este instrumento en un método alternativo ideal en cuanto a detección preventiva de fallas. El fin de este proyecto es presentar un prototipo de cámara acústica ajustado a los requisitos de análisis de un motor eléctrico; durante el desarrollo del proyecto se consideró el costo de manufactura y la estabilidad del equipo.

El prototipo es capaz de adaptarse a otras propuestas de arreglos; sin embargo, los arreglos seleccionados permiten localizar y caracterizar una sola fuente de sonido a una distancia máxima de 0.5m en diferentes ubicaciones dentro del rango del plano de la cámara acústica.

Las pruebas realizadas a los motores eléctricos proporcionan resultados de ubicación de falla específica y frecuencias; es necesario aplicar un factor de corrección a estas frecuencias de manera que se ajusten a los valores de frecuencia obtenidas en las pruebas con el acelerómetro piezoeléctrico. De esta manera, es posible utilizar las gráficas de frecuencia de la cámara acústica para identificación de fallas específicas de motores eléctricos como desalineamiento, desbalances, rupturas, entre otros.

Recomendaciones

- Existen espacios vacíos en los arreglos de los micrófonos, los cuales en el análisis acústico genera un desplazamiento y error en la recepción de las señales transmitidas; aumentar la cantidad de micrófonos incrementará la precisión en la ubicación de la fuente de sonido.
- El costo de los micrófonos y la estructura para realizar el análisis es costoso como se indica en el ANEXO I, y poco práctico para equipos grandes, por

ello, el uso de MEMs (micrófonos electromecánicos) es una opción más barata que incrementa la posibilidad de disponer de una cantidad mayor de micrófonos; en consecuencia, la estructura puede ser liviana y práctica para la movilización y análisis con equipos de gran tamaño.

- Desarrollar una estructura ajustable en cuanto a la distancia entre la fuente de sonido y los micrófonos permitirá ampliar la gama de objetos a analizar.
- Generar una cámara de aislamiento de sonido para pruebas.
- Realiza pruebas de comprobación de posicionamiento de fuentes con angulos pronunciado
- Realizar exploración de otros elementos de interés como instrumentos musicales, plantas industriales, etc.

REFERENCIAS BIBLIOGRÁFICAS

- Acoustic Camera* . (2021). Obtenido de <https://www.acoustic-camera.com/>
- Beer, F. (2015). *Mechanics of Materials*. USA: McGraw Hill.
- CAE Software Systems* . (2021). Obtenido de <https://www.cae-systems.de/en/>
- Castellanos, L. E. (2015). *Desarrollo del plan de Mantenimiento Predictivo en una Planta de Producción Industrial del Sector de Confitería*. Quito.
- Chiariotti, P., Martarelli, M., & Castellini, P. (2019). Acoustic beamforming for noise source localization - Reviews, methodology and applications. *Mechanical Systems and Signal Processing*. *Mechanical Systems and Signal Processing*, 120, 422-448.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.ymsp.2018.09.019>
- Döbler, D., Heilmann, G., & Schnröder, R. (2008). Investigation of the depth of field in acoustic maps and its relation between focal distance and array design. *37th International Congress and Exposition on Noise Control Engineering*. Obtenido de https://www.acoustic-camera.com/fileadmin/acoustic-camera/paper/2008_IN_Doebler_Heilmann_Schroeder_DepthOfField_ArrayDesign.pdf
- Fedorko, G., Liptai, P., & Molnár, V. (2018). Proposal of the methodology for noise sources identification and analysis of continuous transport systems using an acoustic camera. *Engineering Failure Analysis*, 83, 30-46.
doi:<https://doi.org/10.1016/j.engfailanal.2017.09.011>.
- Gonzalez, F. M., Rosales, J. A., Perez, R., Lunati, V. I., & Ortiz, A. H. (2015). Micrófonos MEMS: Análisis y caracterización acústica. *XIII Congreso Argentino de Acústica*. Obtenido de [https://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/adaa2015/A019%20\(Gonz%E11ez\)%20](https://www.fceia.unr.edu.ar/acustica/biblio/adaa2015/A019%20(Gonz%E11ez)%20)

Micrófonos MEMS anélisis y caracterización acústica.pdf

- Grubesa, S., Stamac, J., & Suhanek, M. (2019). Acoustic Camera Design with Different Types of MEMS Microphone Arrays. *American Journal of Environmental Science and Engineering*.
- Grubesa, S., Stamac, J., Krizanic, I., & Petosic, A. (2019). The Development and Analysis of Beamforming Algorithms Used for Designing an Acoustic Camera. *American Journal of Environmental Science and Engineering*, 3(4), 94-102.
doi:10.11648/j.ajese.20190304.15
- MathWorks. (s.f.). Obtenido de <https://la.mathworks.com/discovery/beamforming.html>
- Mediavilla, L. (2019). *Sound visualization with an acoustic camera*. Universidad San Francisco de Quito, Colegio de Ciencias e Ingeniería, Quito. Obtenido de <http://repositorio.usfq.edu.ec/handle/23000/8978>
- NL Acoustics . (2021). Obtenido de <https://nlacoustics.com/>
- Orman, M., Rzeszucinski, P., & Pinto, C. T. (Agosto de 2014). 3D printed acoustic camera for electric motor diagnostics. *Proceedings of the 2014 International Conference on Advanced ICT (ICAICTE 2014)*. doi:<https://doi.org/10.2991/icaicte-14.2014.10>
- Piqué, T. (2001). *NTP 588: Grado de protección de las envolventes de los materiales*. Obtenido de https://www.insst.es/documents/94886/327064/ntp_588.pdf/bdeb68e3-becb-4c26-910d-51ac75df3684
- Sarradj, E., & Herold, G. (2017). A Python framework for microphone array data processing. *Applied Acoustics*, 116, 50-58. doi:<https://doi.org/10.1016/j.apacoust.2016.09.015>.

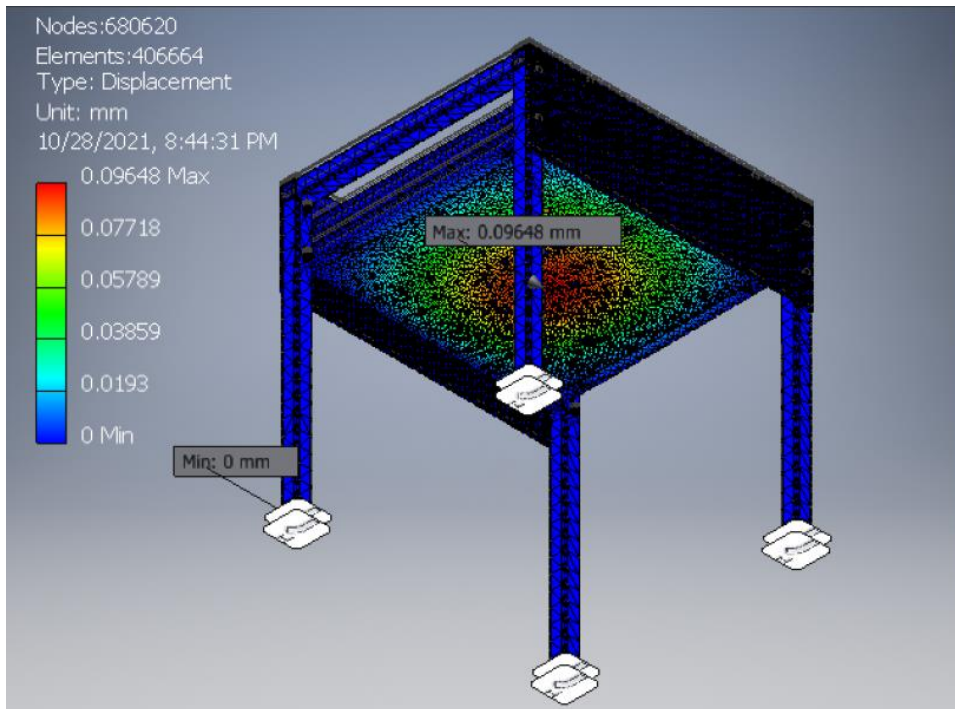
ANEXO A: RESULTADOS DE SIMULACIONES DESPLAZAMIENTO MÁXIMO

Figura 61 Resultado deflexión del arreglo Doble círculo

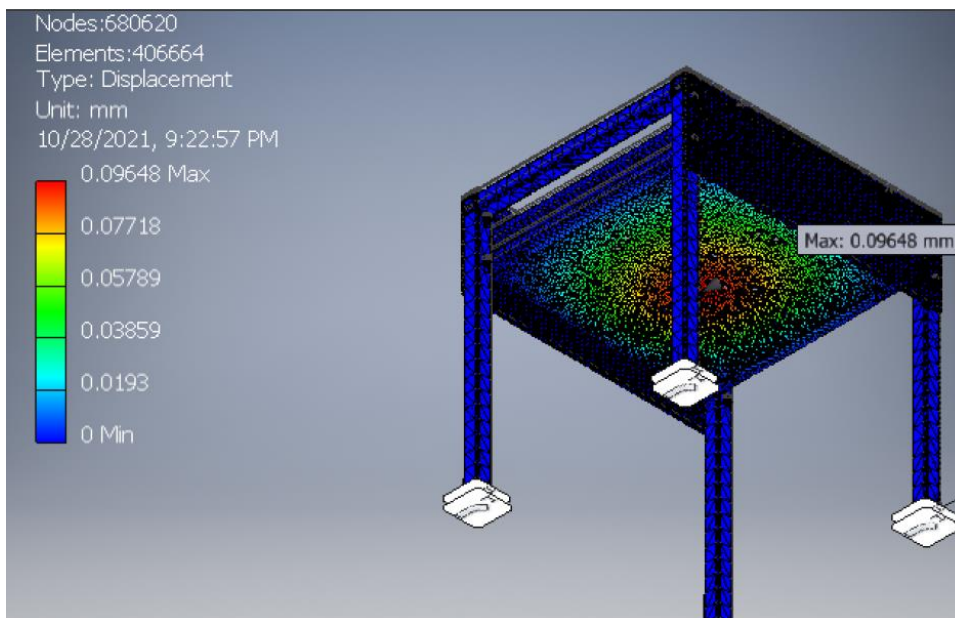


Figura 62 Resultado deflexión del arreglo Espiral

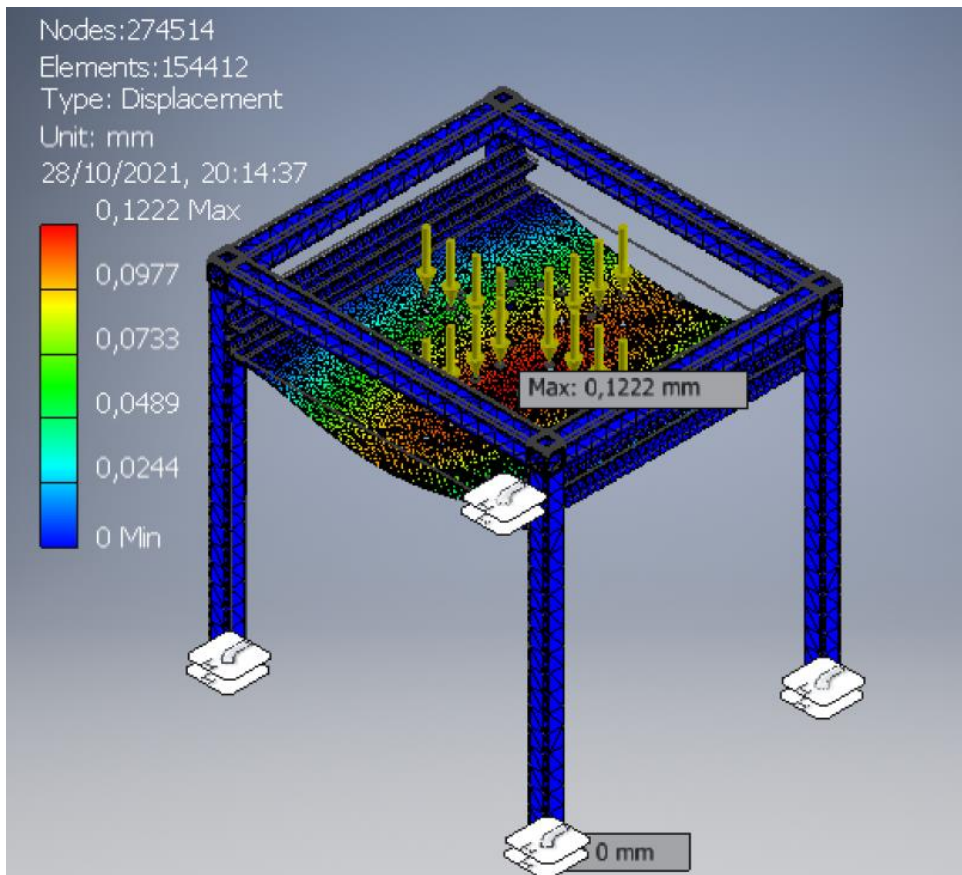
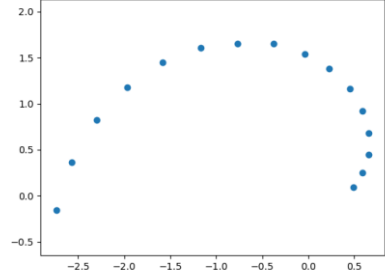
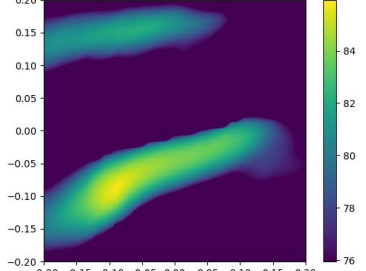
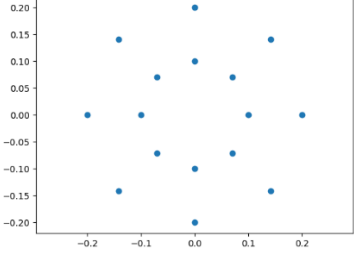
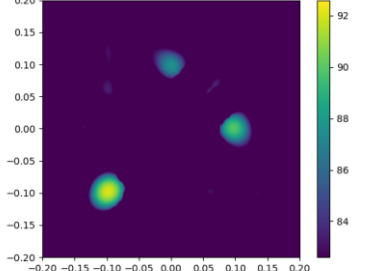
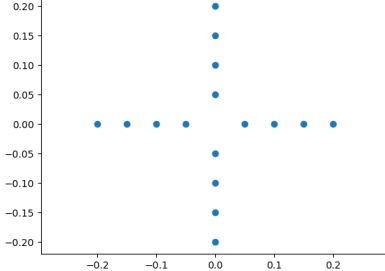
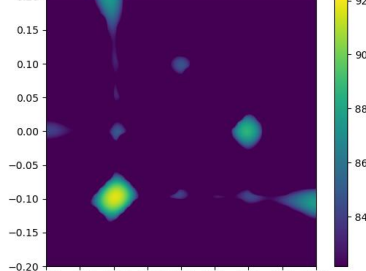
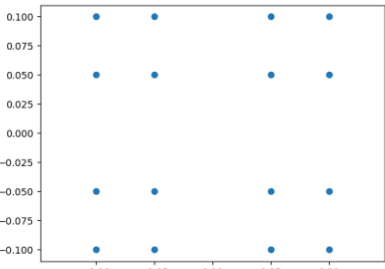
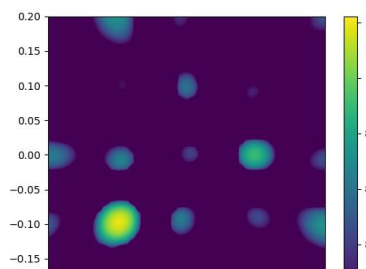
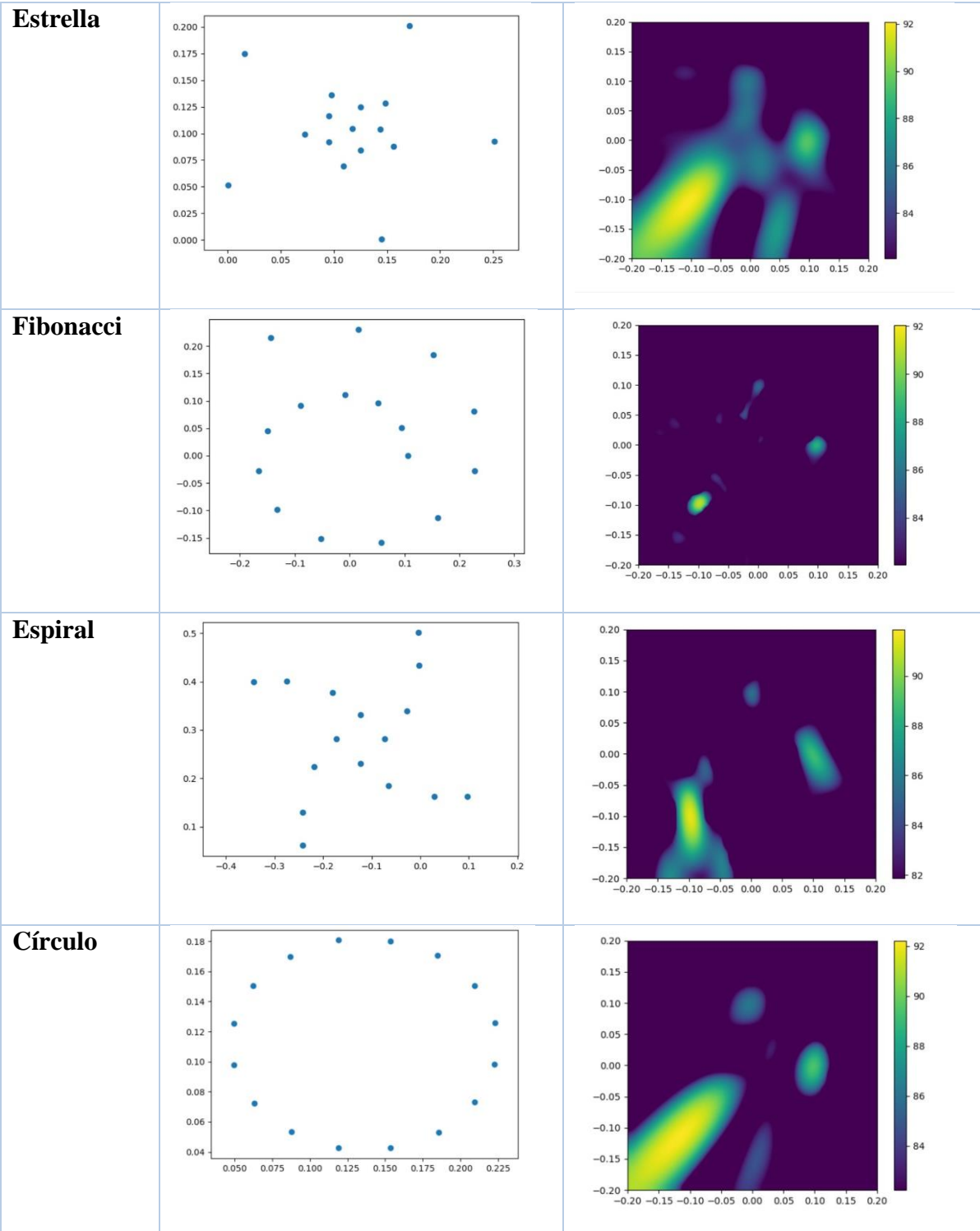


Figura 63 Resultado deflexión del arreglo Cruz

ANEXO B: PROPUESTAS DE ARREGLOS Y RESPUESTA DE SIMULACIÓN

Arreglo	Ubicación	Respuesta
Caracol		
Doble círculo		
Cruz		
Cuadrado		



ANEXO C: ANÁLISIS DE DEFLEXIÓN

Con el fin de comprobar la deflexión máxima de las planchas perforadas, se realiza un cálculo detallado asumiendo que la plancha es una viga rectangular apoyada en ambos extremos.

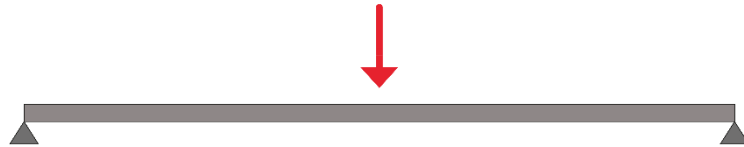


Figura 64 Problema de deflexión en 2D

Se consideran los datos de la tabla 18 para los siguientes cálculos.

Tabla 17 Datos análisis de deflexión

Ancho [m]	0.6
Altura [m]	0.002
Módulo de elasticidad [GPa]	200
Peso total micrófonos y conexiones [kg]	4.149

La ecuación diferencial que gobierna la curva elástica se expresa como:

$$\frac{d^2y}{dx^2} = \frac{M(x)}{EI} \quad (1)$$

Siendo EI el producto de rigidez a flexión, que en este caso al considerarse una viga prismática la rigidez a flexión es constante. Al multiplicarse ambos lados de la ecuación por EI se obtiene que

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = M(x) \quad (2)$$

Se analizan 3 casos:

Carga uniformemente distribuida

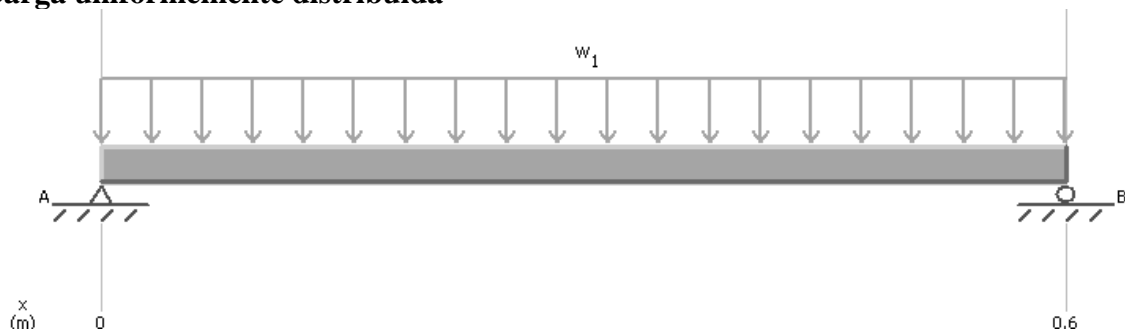


Figura 65 Diagrama carga uniformemente distribuida

A partir del diagrama de cuerpo libre de la porción AC de la viga se obtiene que:

$$M = \frac{1}{2}wLx - \frac{1}{2}wLx^2 \quad (3)$$

Al reemplazar la ecuación 3 en 2, la nueva ecuación es igual a:

$$EI \frac{d^2y}{dx^2} = \frac{1}{2}wLx - \frac{1}{2}wLx^2$$

Se integra dos veces para x

$$EI \frac{dy}{dx} = -\frac{1}{6}wx^3 + \frac{1}{4}wLx^2 + C_1$$

$$EIy = -\frac{1}{24}wx^4 + \frac{1}{12}wLx^3 + C_1x + C_2 \quad (4)$$

Dado que las condiciones de frontera indican que en el punto A $x = 0$, $y = 0$ y en el punto B $x = L$, $y = 0$ se obtiene que $C_2 = 0$. Asimismo, se reemplaza este resultado en la ecuación 3 y se encuentra el valor de C_1 .

$$0 = -\frac{1}{24}wL^4 + \frac{1}{12}wL^4 + C_1L$$

$$C_1 = -\frac{1}{24}wL^3$$

Se reemplaza estos últimos valores en la ecuación 4

$$EIy = -\frac{1}{24}wx^4 + \frac{1}{12}wLx^3 - \frac{1}{24}wL^3x$$

$$y = \frac{w}{24EI}(-x^4 + 2Lx^3 - L^3x)$$

Haciendo que $x = L/2$ (la pendiente de la viga es cero para este valor) se encuentra que

$$y = \frac{w}{24EI} \left(-\frac{L^4}{16} + 2L\frac{L^3}{8} - L^3\frac{L}{2} \right)$$

La deflexión máxima es:

$$y = \frac{5wL^4}{384EI} \quad (5)$$

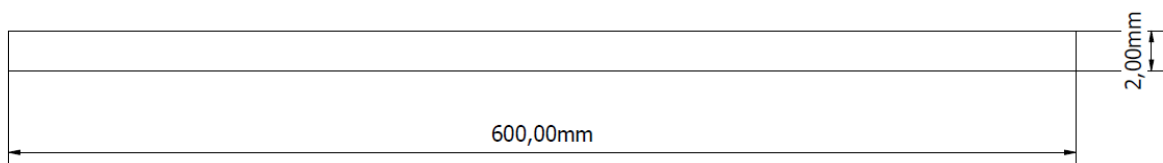


Figura 66 Dimensiones viga rectangular

Al asumirse una viga rectangular, la inercia se calcula como:

$$I = \frac{1}{12}bh^3$$

$$I = \frac{1}{12}(0.6m)(0.002m)^3$$

$$I = \frac{1}{12}(0.6)(0.002)^3$$

$$I = 4.00 \times 10^{-10} m^4$$

La carga distribuida es igual a:

$$w = \frac{\text{Peso total}}{\text{Base}}$$

$$w = \frac{(4.149kg)(9.8m/s^2)}{0.6m}$$

$$w = 67.767N$$

Utilizando los valores de la tabla 19 y los resultados obtenidos de inercia y carga distribuida en la ecuación 5, se encuentra la deflexión máxima

$$y_{m\acute{a}x} = \frac{5(67.767N/m)(0.6m)^4}{384(200GPa)(4.00 \times 10^{-10}m^4)}$$

$$y_{m\acute{a}x} = 0.0014m$$

Es decir,

$$y_{m\acute{a}x} = 1.4mm$$

Carga puntual a 1/2L de la viga

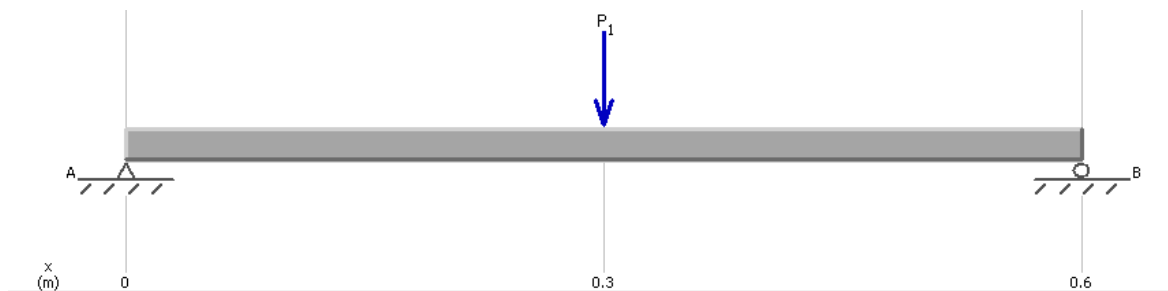


Figura 67 Diagrama carga puntual a 1/2L de la viga

La ecuación para deflexión máxima en una viga apoyada en sus extremos para el caso de una carga puntual ubicada en el centro de la viga es:

$$y_{m\acute{a}x} = -\frac{PL^3}{48EI}$$

(Beer, 2015)

Con los datos de la tabla 19 y el valor de inercia encontrado previamente, se obtiene que:

$$y_{m\acute{a}x} = -\frac{(4.149kg)(9.8\ m/s^2)(0.6)^3}{48(200GPa)(4.00 \times 10^{-10}m^4)}$$

$$y_{m\acute{a}x} = 0.00228\ m$$

Es decir,

$$y_{m\acute{a}x} = 2.28\ mm$$

Carga puntual a 3/4L de la viga



Figura 68 Diagrama carga puntual a 3/4L de la viga

La ecuación correspondiente para deflexión máxima en una viga apoyada en sus extremos, en el caso de una carga puntual ubicada a 3/4L de la viga es:

Cuando $a > b$:

$$y_{m\acute{a}x} = -\frac{Pb(L^2 - b^2)^{\frac{3}{2}}}{9\sqrt{3} EIL}$$

(Beer, 2015)

Resolviendo la ecuación con los datos de la tabla 19 y el resultado de inercia se escribe,

$$y_{m\acute{a}x} = -\frac{(4.149kg)(9.8\ m/s^2)(0.6m)(0.6^2 - 0.002^2)^{\frac{3}{2}}}{9\sqrt{3} (200GPa)(4.00 \times 10^{-10}m^4)(0.6m)}$$

$$y_{m\acute{a}x} = 0.0015\ m$$

Es decir,

$$y_{m\acute{a}x} = 1.5 \text{ mm}$$

ANEXO D: CÓDIGO PARÁMETRO F

Con el fin de comprobar el parámetro F, se realizó un código en Matlab que identifica las matrices únicas y los elementos de la función del parámetro F.

```

M = 16; %se define la cantidad de micrófonos del arreglo
mics = [ 0 0.05 0
0 0.1 0
0 0.15 0
0 0.2 0
0.05 0 0
0.1 0 0
0.15 0 0
0.2 0 0
0 -0.05 0
0 -0.1 0
0 -0.15 0
0 -0.2 0
-0.05 0 0
-0.1 0 0
-0.15 0 0
-0.2 0 0
]; % se ubican las posiciones de (x,y,z) los microfonos

% se utiliza solo las columnas del plano (x,y)
mics = mics(:, 1:2);

X = zeros(M,M,2); % co-array matrix

% Calc. co-array matrix;
% llenar cada espacio con un vector resultante de la resta de la posición de
% mic m - mic n
for m = 1:M
    for n = 1:M

```

```

        X(m,n,:)= mics(m,:)-mics(n,:);
    end
end

% Confirme que debe haber M vectores "cero" en la matriz de co-matriz,
% verifique cada "ranura" de la matriz, coloque el vector en esa ranura, calcule
su norma
zero_vectors = 0;
for m = 1:M
    for n = 1:M
        v = X(m,n,:);
        if norm([ v(:,1), v(:,2) ])==0
            zero_vectors = zero_vectors+1;
        end
    end
end
zero_vectors

% Cuento vectores únicos dentro de la "matriz de vectores" llamada matriz co-
matriz
unique_count = 0;
for i = 1:M
    for j = 1:M
        % Take a vector as reference
        ref = [ X(i,j,1), X(i,j,2) ];
        is_unique = true;

        % Comparación de las matrices con las referencias
        for k = 1:M
            for l=1:M
                % salto de la comparación con la misma matriz
                if (k == i) && (l==j)
                    continue
                end
            end
        end
    end
end

```

% si se encuentra algún vector con las mismas coordenadas; la referencia no es única, rompa los bucles y no

% incremente el Contador

```
if all( ref==[X(k,1,1), X(k,1,2)])
```

```
    is_unique = false;
```

```
    break
```

```
end
```

```
end
```

```
if ~is_unique
```

```
    break
```

```
end
```

```
end
```

```
if is_unique
```

```
    unique_count = unique_count+1;
```

```
end
```

```
end
```

```
end
```

```
U = unique_count
```

```
U_max = (M^2) - (M-1)
```

```
F = U/U_max
```

ANEXO E: SIMULACIÓN DE DEFLEXIÓN EN MDSOLIDS

Arreglo Fibonacci

La vista lateral de este arreglo indica los 16 micrófonos por lo cual cada la magnitud de fuerza de cada uno es P_N .

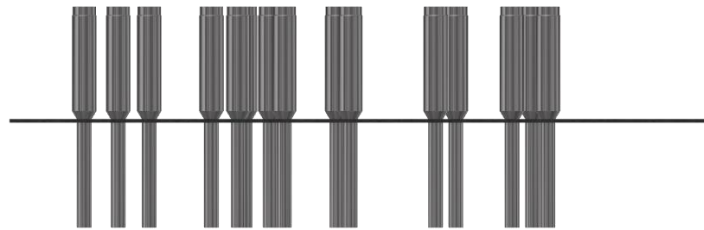


Figura 69 Vista lateral del arreglo Fibonacci

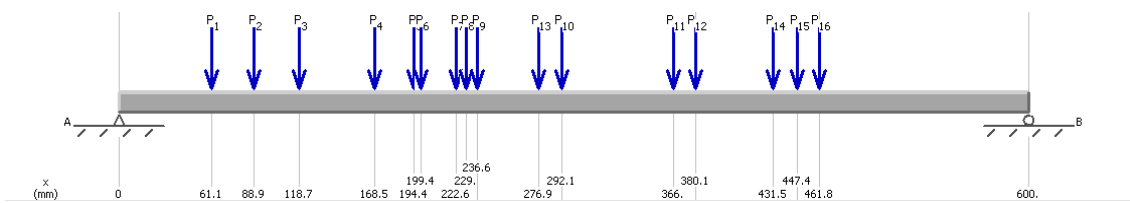


Figura 70 Diagrama de carga del arreglo Fibonacci

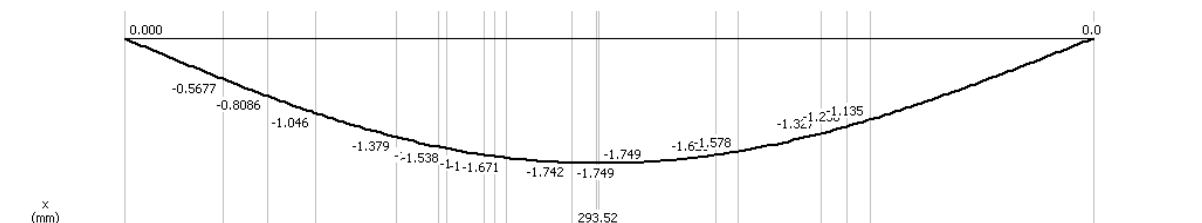


Figura 71 Diagrama de deflexión del arreglo Fibonacci

Arreglo doble círculo

Este arreglo distribuye la magnitud de las fuerzas de acuerdo a la siguiente tabla:

Tabla 18 Magnitud de fuerza correspondiente para el arreglo doble círculo

#	Magnitud de fuerza correspondiente
P_1	P_N
P_2	$2P_N$

P_3	P_N
P_4	$2P_N$
P_5	$4P_N$
P_6	$2P_N$
P_7	P_N
P_8	$2P_N$
P_9	P_N

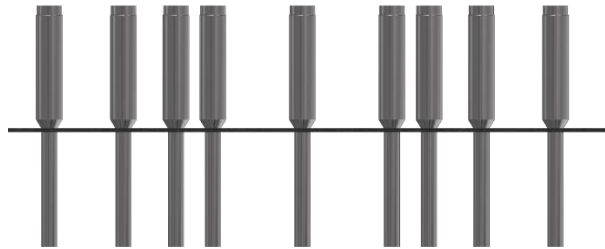


Figura 72 Vista lateral del arreglo doble círculo

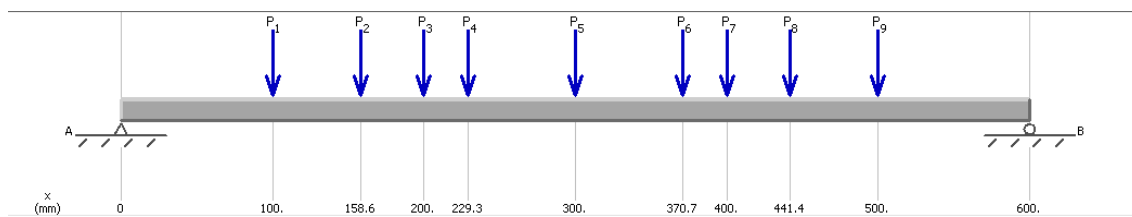


Figura 73 Diagrama de carga del arreglo doble círculo

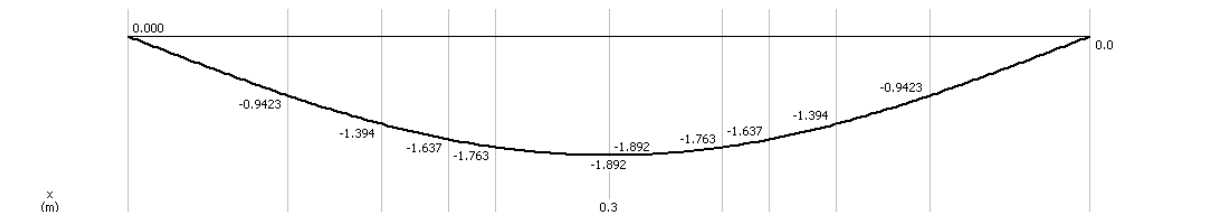


Figura 74 Diagrama de deflexión del arreglo doble círculo

Arreglo espiral

La vista lateral de este arreglo presenta todos los micrófonos, por lo tanto, se asigna el valor P_N a cada posición de carga.

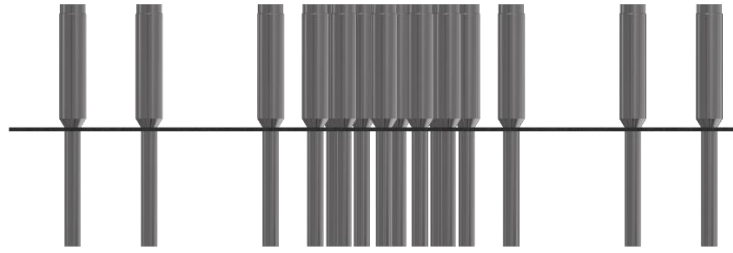


Figura 75 Vista lateral del arreglo espiral

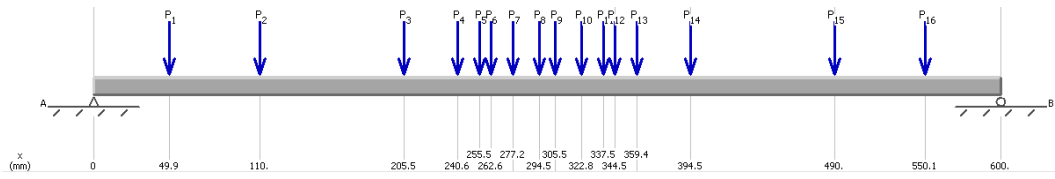


Figura 76 Diagrama de carga del arreglo espiral

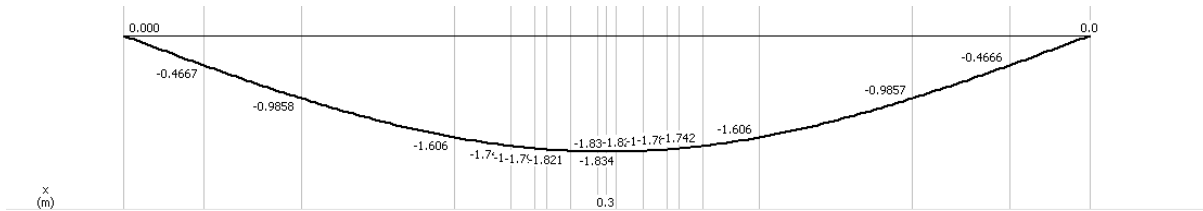


Figura 77 Diagrama de deflexión del arreglo espiral

ANEXO F: CALIBRACIÓN INDIVIDUAL PARA CADA MICRÓFONO

Especialistas de sonido utilizan la sensibilidad como un indicador de calidad o estado del micrófono, este factor está establecido por el fabricante del producto.

Desafortunadamente, los ingenieros al analizar sus datos confían en la fiabilidad de la respuesta de frecuencia y no toman en cuenta el deterioro del micrófono. Es decir, es necesario realizar una nueva calibración con el fin de comprobar la respuesta de frecuencia y decidir si es esencial aplicar un factor de corrección, con el fin de aumentar la precisión de las mediciones.

El método de calibración realizado para los 16 micrófonos se basa en tomar dos datos de entrada de Voltaje [V] por cada micrófono, en el cuarto de laboratorio aislado y con la fuente de estudio (Ruido blanco), con el fin de analizar nuestros datos en las condiciones reales del laboratorio y obtener un solo factor de calibración general. Por lo tanto, se calcula para cada uno de los micrófonos un factor de calibración en [V/Pa] que será multiplicado por la sensibilidad real de cada micrófono, finalmente se comprueba que cada dispositivo tenga la misma medida de presión media [Pa].

La calibración se realiza con el mejor resultado de arreglo obtenido, en este caso el arreglo de doble círculo.

Tabla 19 Parámetros del micrófono condensador

DATOS DEL MICRÓFONO	
Model:	ECM8000 (label 1)
Nominal Sensitivity (mv/Pa):	0.316

Condiciones de la habitación aislada para calibración

1. Recolección de parámetros necesarios en una habitación aislada.

Se adquiere los datos de nivel de presión acústica en la habitación de laboratorio aislado de ruido.

Tabla 20 Datos nivel de presión acústica

Nivel de presión acústica	
Calibration SPL dB:	40
Calibration Pressure [Pa]:	2.00E-03

Todos los micrófonos serán medidos en una misma posición de referencia; se escoge el micrófono uno con las siguientes posiciones.

Tabla 21 Posición del micrófono de prueba

Posición micrófono prueba	
X [m]	0
Y [m]	0.1
Z [m]	0

2. Datos de Voltaje RMS (voltaje eficaz) tomados por LabView en el micrófono de referencia

Para esta prueba de muestreo se registra cinco medidas de entrada de voltaje en LabView en la habitación de laboratorio, de preferencia la habitación debe encontrarse aislada de ruido.

Tabla 22 Medidas de entrada de voltaje

Measured Vrms (mV)	10.39	8.23	9.15	9.04	8.63
---------------------------	--------------	-------------	-------------	-------------	-------------

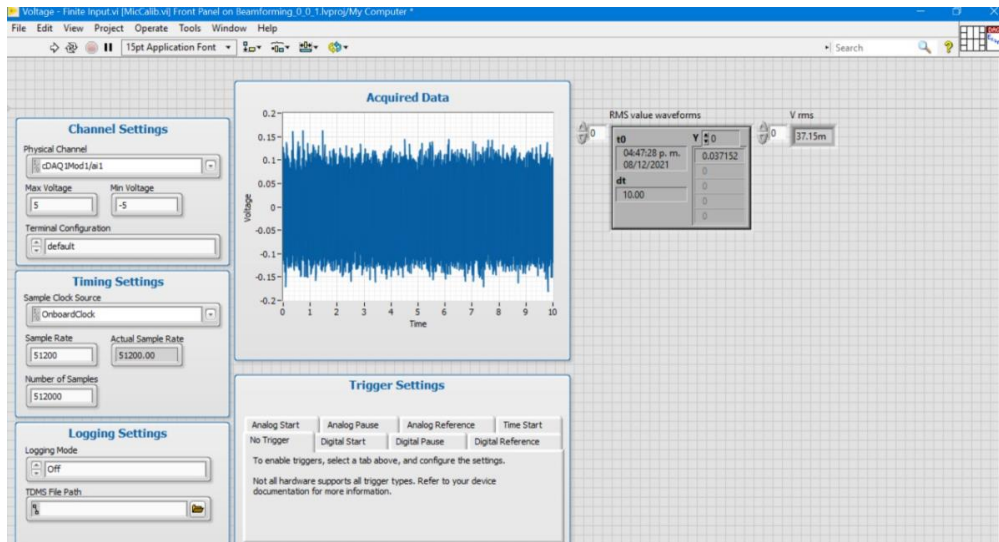


Figura 78 Calibración en LabView

3. Cálculo del Factor de calibración, habitación aislada

Se realiza un promedio de los cinco datos del Measured Vrms del micrófono de referencia; se obtiene la sensibilidad en la condición de la habitación aislada, dividiendo a la presión de calibración.

$$\text{sensitivity factor} = \left[\frac{\text{Measured Vrms}}{\text{Calibration Pressure}} \right] = \frac{9.008 \text{ mV}}{2.00E - 03 \frac{\text{mV}}{\text{Pa}}} = 4544.00 \text{ Pa}$$

4. Lectura calibrada

Con el fin de comprobar el factor de calibración, se calcula el nuevo nivel de presión sonora; se verifica que se recibe el mismo valor de nivel de presión acústica de la habitación aislada.

L_p: Nivel de presión sonora

p_o: Presión sonora de referencia, 0.00002 [Pa].

intensidad mínima de sonido capaz de detectar el oído humano

p: Presión de sonido, cantidad captada de campo de sonido habitación

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right)$$

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{0.002 \text{ Pa}}{0.00002 \text{ Pa}} \right) = 40 \text{ SPL db}$$

De esta forma, es posible verificar que el factor de calibración cumple con las condiciones acústicas del laboratorio.

Condiciones de la habitación con fuente de sampling para calibración final

A partir de los datos de referencia del micrófono calibrado anteriormente, se conoce la nueva sensibilidad nominal, con el fin de considerar las diferentes fuentes que se pueda muestrear para la calibración final del laboratorio.

La fuente produce ruido blanco con el fin de tener una mejor referencia de captación de sonido constante y uniforme.

Tabla 23 Parámetros habitación con fuente (ruido blanco)

NUEVOS PARAMETROS	
Model:	ECM8000 (label 1)
New Nominal Sensitivity (mv/Pa):	4544.00

1. Registro de parámetros necesarios, habitación con fuente (Ruido Blanco).

Todos los micrófonos serán medidos en una misma posición de referencia, se escoge el micrófono uno con las posiciones de la tabla 22.

2. Datos de Voltaje RMS (Voltaje eficaz) proporcionados por LabView por el micrófono de referencia

Para esta prueba de muestreo se registra cinco medidas de entrada de voltaje en LabView en la habitación de laboratorio.

Tabla 24 Medidas de entrada de voltaje para segunda condición de calibración

Measured Vrms (mV)	65.15	64.66	64.34	64	64.89
--------------------	-------	-------	-------	----	-------

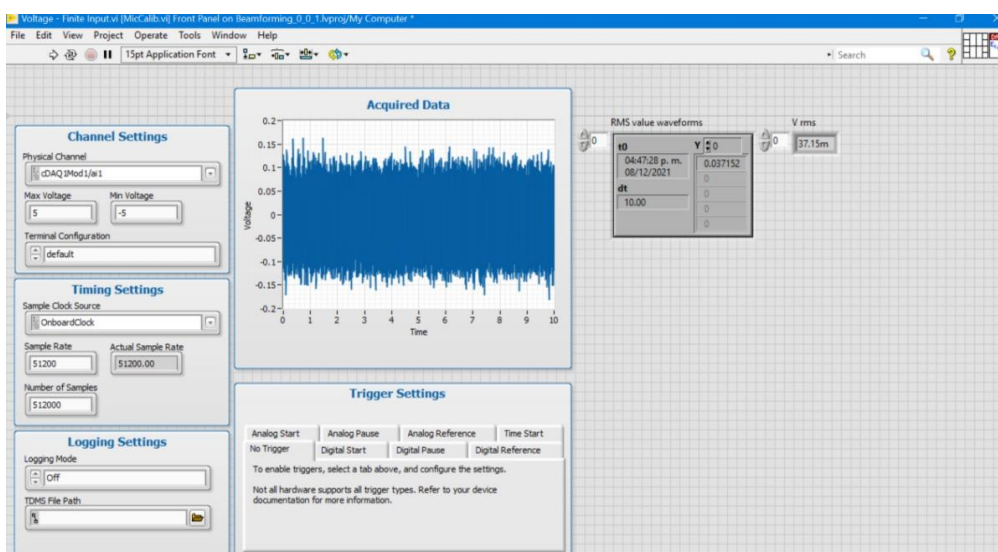


Figura 79 Segunda calibración en LabView

3. Cálculo del factor de calibración estándar, habitación con fuente de sonido.

Al realizar un promedio de los cinco datos del micrófono de referencia, obtenemos la sensibilidad en la condición de la habitación con fuente de sonido, dividiendo al factor de sensibilidad.

$$\text{Factor calibración [Pa]} = \left[\frac{\text{Measured Vrms}}{\text{sensitive factor}} \right] = \frac{64.608 \text{ mV}}{4544.0 \text{ mV/Pa}} = 0.0142 \text{ Pa}$$

4. Validación de Lectura calibrada.

Con el fin de comprobar el factor de calibración, se calcula el nuevo nivel de presión sonora; se verifica si se recibe el mismo valor de nivel de presión acústica de la habitación aislada.

L_p: Nivel de presión sonora

p₀: Presión sonora de referencia, 0.00002 [Pa].

intensidad mínima de sonido capaz de detectar el oído humano

p: Presión de sonido, cantidad captada de campo de sonido habitación

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{p}{p_0} \right)$$

$$L_p = 20 \log_{10} \left(\frac{0.142 \text{ Pa}}{0.00002 \text{ Pa}} \right) = 57.04 \text{ SPL db}$$

De esta forma, es posible verificar si el factor de calibración cumple con las condiciones acústicas del laboratorio; el factor del nivel presión sonora aumenta por la reproducción de la fuente en la habitación de estudio. Esto demuestra que el espacio acústico está listo para registrar datos de muestreo solo para un micrófono.

Calibración General de los 16 micrófonos

A partir de la obtención del factor de calibración 0.0142 [Pa] para el micrófono de referencia en las condiciones de estudio, es necesario aplicar el mismo factor en los demás micrófonos condensadores, de tal forma que todos los dispositivos puedan tener el mismo factor de presión media para garantizar que el muestreo de frecuencia reproducido por una fuente reciba el mismo nivel de presión sonora.

1. Datos de Voltaje RMS (Voltaje eficaz) tomados por LabView para los 16 micrófonos

Se registra cinco medidas de voltaje eficaz (V RMS) para los 15 micrófonos restantes, para la aplicación del factor de calibración.

Tabla 25 Datos muestreo de voltaje

Matriz de muestreo de Voltaje					
Mic	rms (mV)	rms (mV)	rms (mV)	rms (mV)	rms (mV)
1	65.15	64.66	64.34	64.00	64.89
2	58.00	59.00	57.90	57.82	58.43
3	57.68	57.78	57.32	58.43	57.61
4	58.08	57.89	58.76	57.89	58.15
5	67.81	67.15	66.81	66.91	66.73
6	49.30	48.74	48.80	48.83	48.77
7	55.47	56.00	55.68	55.82	55.90
8	53.34	53.07	52.86	52.96	53.30
9	59.97	60.20	60.21	61.25	60.57
10	67.20	67.14	67.16	67.24	67.26
11	77.24	77.06	77.22	76.99	77.25
12	53.33	53.21	53.58	53.54	53.46
13	72.82	72.37	72.58	72.32	73.11
14	69.06	68.83	68.83	69.18	69.27
15	75.55	75.09	74.76	75.46	74.96
16	59.52	59.02	59.48	59.00	58.79

2. Cálculo del factor de presión media para cada micrófono

Considerando al micrófono uno como referencia, se mide la presión media con el factor de calibración estándar 0.0142 Pa y el *Measured Vrms* del mismo micrófono.

$$\text{sensitive factor} = \left[\frac{\text{Measured Vrms}}{\text{Factor de calibración}} \right] = \frac{64.608 \text{ mV}}{0.0142 \text{ Pa}} = 4544.0 \text{ mV/Pa}$$

$$\text{Measured Pressure [Pa]} = \left[\frac{\text{Measured Vrms}}{\text{sensitive factor}} \right] = 0.01421831 \text{ Pa}$$

La nueva presión media del micrófono uno servirá como referencia para comprobar que el resto de micrófonos obtengan el mismo valor. Se procede a realizar el mismo cálculo para los 15 micrófonos restantes.

Tabla 26 Resultados de calibración para cada micrófono

S (mV/Pa)	S (V/Pa)	Measured Pressure [Pa]
4544.00000000	4.54400000	0.01421831
4095.42347697	4.09542348	0.01421831
4062.64883606	4.06264884	0.01421831
4090.07825656	4.09007826	0.01421831
4718.00099059	4.71800099	0.01421831
3438.38335810	3.43838336	0.01421831
3922.68845963	3.92268846	0.01421831
3735.04309064	3.73504309	0.01421831
4250.85685983	4.25085686	0.01421831
4726.30014859	4.72630015	0.01421831
5487.39494115	5.48739494	0.01405986
3799.75356875	3.79975357	0.01405986
4879.17457502	4.87917458	0.01488776
4636.96224686	4.63696225	0.01488776
5048.70977088	5.04870977	0.01488776
3973.86737620	3.97386738	0.01488776

Es posible validar que cada presión media en los 16 micrófonos es idéntica; se procede a compilar la información de sensibilidad (V/Pa) en el archivo de Python llamado Beamforming.py

Compilación de la nueva calibración en Python

Para compilar la nueva calibración es necesario crear un archivo .xml y finalmente se adjunta la información.

```

<Calib name="ECM8000_16_09_2021_1">
  <pos Name="Point 1" factor="4.54400000"/>
  <pos Name="Point 2" factor="4.09542348"/>
  <pos Name="Point 3" factor="4.09542348"/>
  <pos Name="Point 4" factor="4.09007826"/>
  <pos Name="Point 5" factor="4.71800099"/>
  <pos Name="Point 6" factor="3.43838336"/>
  <pos Name="Point 7" factor="3.92268846"/>
  <pos Name="Point 8" factor="3.73504309"/>
  <pos Name="Point 9" factor="4.25085686"/>
  <pos Name="Point 10" factor="4.72630015"/>
  <pos Name="Point 11" factor="5.48739494"/>
  <pos Name="Point 12" factor="3.79975357"/>
  <pos Name="Point 13" factor="4.87917458"/>
  <pos Name="Point 14" factor="4.63696225"/>
  <pos Name="Point 15" factor="5.04870977"/>
  <pos Name="Point 16" factor="3.97386738"/>
</Calib>

```

Figura 80 Archivo .xml

```

print("Freq range: %.3f Hz - %.3f Hz" % (lower_freq, higher_freq))
print("Center: %.3f Hz || n: %.3f" % (center_freq, inv_bandwidth))

#ts = acoular.TimeSamples(name=datafile)
ts = acoular.MaskedTimeSamples(name=datafile)

# Calibration factors (in Pa/V)
# assuming input data is in V, this will convert data to Pa, and scale it according to calibration
ts.calib = acoular.Calib(from_file="../xml/ECM8000_16_09_2021_01.xml") # NEW
#invalid = [5,6,7,8]
#invalid = [3,4, 7,8, 11,12, 15,16] # list of invalid channels (unwanted microphones etc.)
invalid = []
#ts.start = 179199

ts.invalid_channels = invalid

ps = acoular.PowerSpectra(time_data=ts, block_size=1024 , window='Hanning')

```

Figura 81 Datos adjuntos de calibración

ANEXO G: HOJAS DE PROCESO

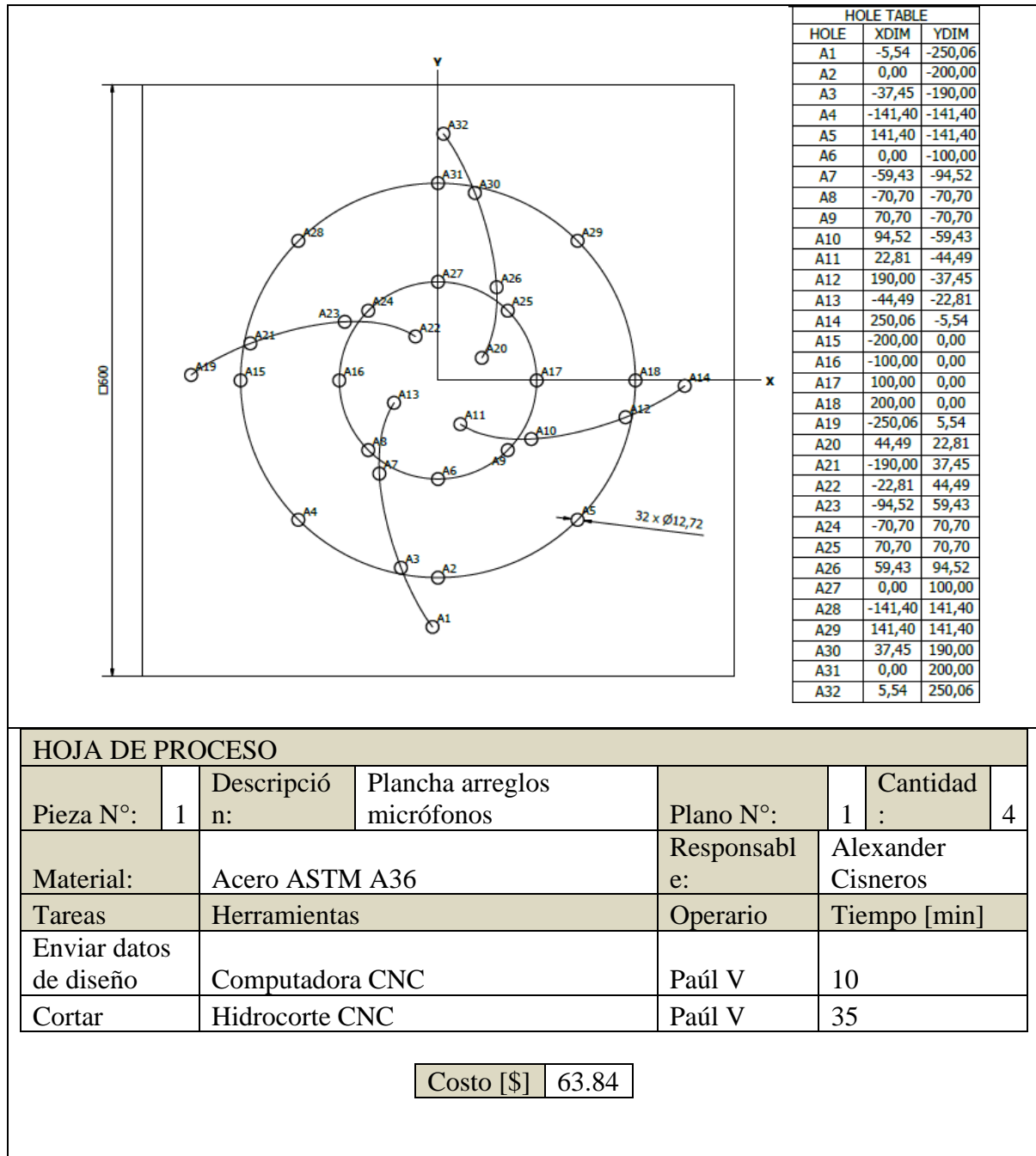


Figura 82 Hoja de proceso para planchas de acero

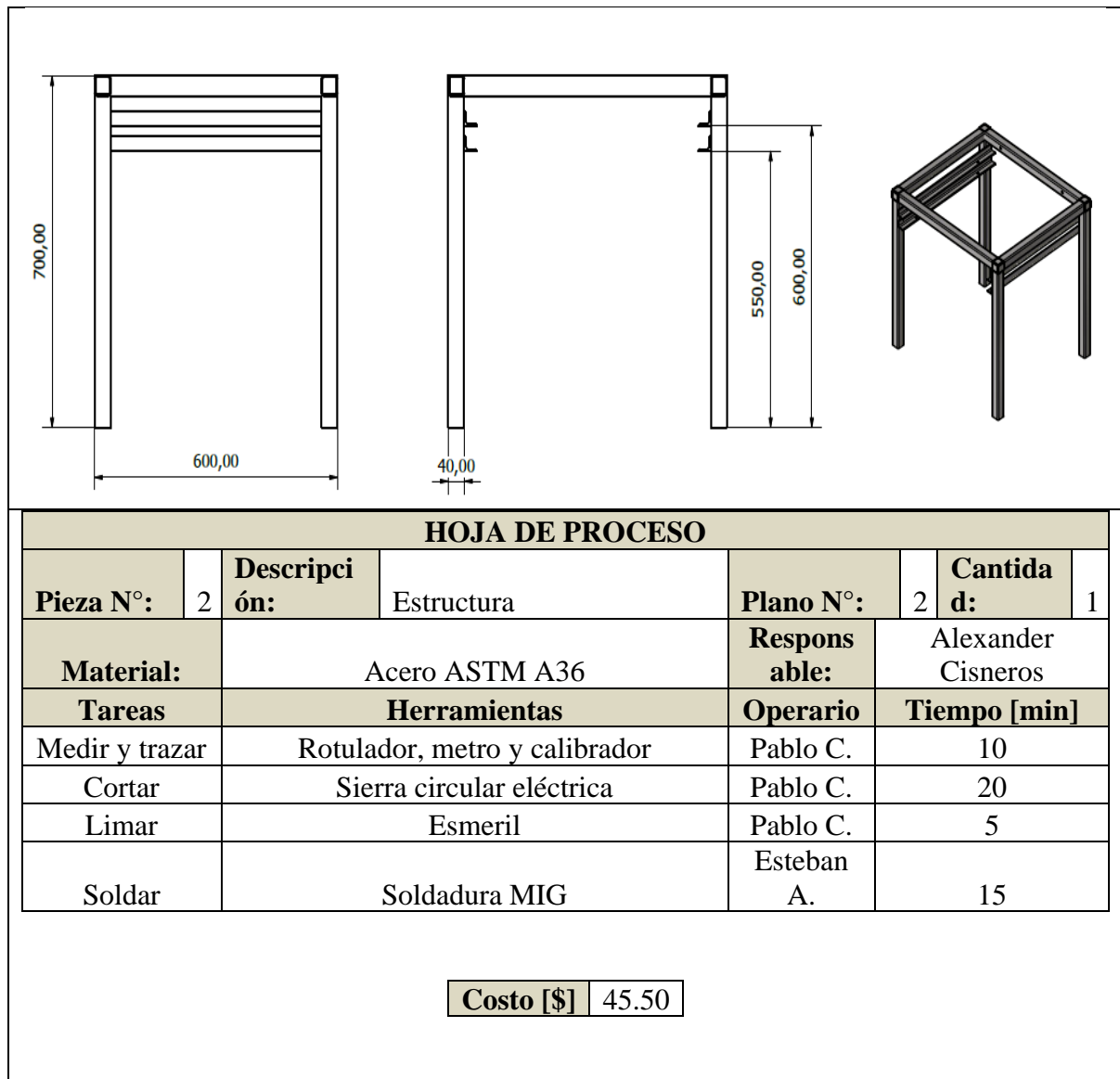





Figura 83 Hoja de proceso estructura

	Acción de transporte		Punto final de proceso
	Toma de decisión		Acción preparación
	Operación a realizar		Rechazo de material
	Acción de inspección		Tiempo de demora

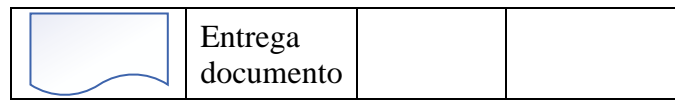


Figura 84 Simbología diagrama de flujo

ANEXO H: ANÁLISIS DE RIESGO

Tabla 27 Resumen análisis de riesgo

Código	Descripción	Prioridad= impacto x probabilidad	Responsable	Decisión tomada	Estatus	Observación
003	Fallo del software Labview por actualizaciones, no reconocimiento de subprogramas y mala conexión con los micrófonos.	16	Andres Fierro	Verificación de la correcta instalación y función de los programas con retroalimentación de Lino Mediavilla.	Cerrado	Uso del software Phyton o controlador de sistema en caso de falla en la ejecución del software Labview.
007	Estabilidad de la estructura/soprote de micrófonos	16	Adela Morales	Consideración del peso de la estructura y los micrófonos.	Cerrado	Diseño y análisis de estructura.
001	Cantidad de micrófonos disponibles para el arreglo de la cámara acústica.	15	Andres Fierro	Revisión de los micrófonos por medio de pruebas para verificar su funcionalidad.	Cerrado	Considerar otras fuentes de alimentación.
005	Precisión en la fabricacion de arreglos para los micrófonos.	12	Alexander Cisneros	Preguntar a varios proveedores sobre la fabricación que utilizan de manera que sea posible escoger la mejor opción.	Cerrado	Asegurarse que la fabricacion se realice con maquinas CNC y buena mano de obra.
006	Flexión en la estructura a causa del peso de los micrófonos conectados.	6	Alexander-Adela	Simulación estática de la estructura.	Cerrado	Elección del material en base a la disponibilidad y la funcion.
010	Adaptaciones de conexiones eléctricas no adecuados para la cámara acústica.	6	Andres - Dilan	Utilización de un regulador de voltaje y fuentes de alimentación adecuados.	Cerrado	Anticipar adaptadores extras en caso de existir una variación de corriente.

012	Falta de instaladores en la computadora que no reconozca el DAC o la cámara digital externa.	4	Dilan Tituaña	Consideración del uso e instalación de los programas Python y LabView en otras computadoras.	Cerrado	Probar los programas con antelación en todos los equipos.
002	Consideración del peso (estructura y micrófonos) para regular la posición de la cámara acústica.	4	Alexander Cisneros	Se considera el material, la geometría y las cargas aplicadas en la estructura.	Cerrado	Se estudia la posibilidad del uso de otros materiales más livianos con el fin de disminuir el peso de la estructura.
008	Mala sujeción de micrófonos por una tolerancia incorrecta de corte en las planchas	2	Alexander-Adela	Consideración de una tolerancia adecuada en los planos de fabricación.	Cerrado	Prevenir al fabricante las tolerancias necesarias.
011	Mala consideración de dimensiones de arreglos, sobredimensión de los arreglos.	2	Andres - Dilan	Tomar como referencia las dimensiones del arreglo de Lino Mediavilla para la fabricación de los nuevos arreglos.	Cerrado	El tamaño del arreglo debe ser menor a 1 metro de diámetro.
009	Falta de librería td_dir en Python, no permite ejecutar el programa three_sources.py y no genera el archivo .h5	1	Andres Fierro	Búsqueda del programa y subprograma en otras librerías de acoular.	Cerrado	Retraso en la simulación de los arreglos y por consecuencia paralización del trabajo.
004	Retraso en la entrega de la estructura metálica debido a fallas de fabricación y subcontratistas.	1	Dilan Tituaña	Comunicarse frecuentemente con el proveedor de las entregas.	Cerrado	Realizar un plano detallado de la estructura para evitar confusiones con el proveedor.

Tabla 28 Riesgo 001. Cantidad de micrófonos disponibles para el arreglo de la cámara acústica

Impacto	5			15		
	4					
	3					
	2					
	1					
		1	2	3	4	5
Probabilidad						

Tabla 29 Riesgo 002. Consideración del peso (estructura y micrófonos) para regular la posición de la cámara acústica.

Impacto	5					
	4					
	3					
	2		4			
	1					
		1	2	3	4	5
Probabilidad						

Tabla 30 Riesgo 003. Fallo del software Labview por actualizaciones, no reconocimiento de subprogramas y mala conexión con los micrófonos.

Impacto	5					
	4				16	
	3					
	2					
	1					
		1	2	3	4	5
Probabilidad						

Tabla 31 Riesgo 004. Retraso en la entrega de la estructura metálica debido a fallas de fabricación y subcontratistas.

Impacto	5					
	4					
	3					
	2					
	1	1				
		1	2	3	4	5
Probabilidad						

Tabla 32 Riesgo 005. Precisión de la fabricación de arreglos para micrófonos

Impacto	5					
	4			12		
	3					
	2					
	1					
		1	2	3	4	5
Probabilidad						

Tabla 33 Riesgo 006. Flexión a causa del peso de micrófonos conectados

Impacto	5					
	4					
	3		6			
	2					
	1					
		1	2	3	4	5
Probabilidad						

Tabla 34 Riesgo 007. Estabilidad de la estructura soporte de micrones

Impacto	5					
	4				16	
	3					
	2					
	1					
			1	2	3	4
		Probabilidad				

Tabla 35 Riesgo 008. Mala sujeción de microfones por una tolerancia incorrecta de corte en las planchas

Impacto	5					
	4					
	3					
	2	2				
	1					
			1	2	3	4
		Probabilidad				

Tabla 36 Riesgo 009. Falta de librería `td_dir` en Python, no permite que corra el programa `three_sources.py` y no se genere el archivo `.h5`

Impacto	5					25
	4					
	3					
	2					
	1					
			1	2	3	4
		Probabilidad				

Tabla 37 Riesgo 010. Adaptaciones de conexiones electricas no adecuados para la camara acustica

Impacto	5					
	4					
	3					
	2			6		
	1					
		1	2	3	4	5
Probabilidad						

Tabla 38 Riesgo 011. Mala consideracion de dimensiones de arreglos, sobredimensión de los arreglos

Impacto	5					
	4					
	3					
	2					
	1		2			
		1	2	3	4	5
Probabilidad						

Tabla 39 Riesgo 012. Falta de instaladores en la computadora que no reconozca el DAC o la camara digital externa

Impacto	5					
	4					
	3					
	2		4			
	1					
		1	2	3	4	5
Probabilidad						

ANEXO I: GESTIÓN DE PROYECTOS

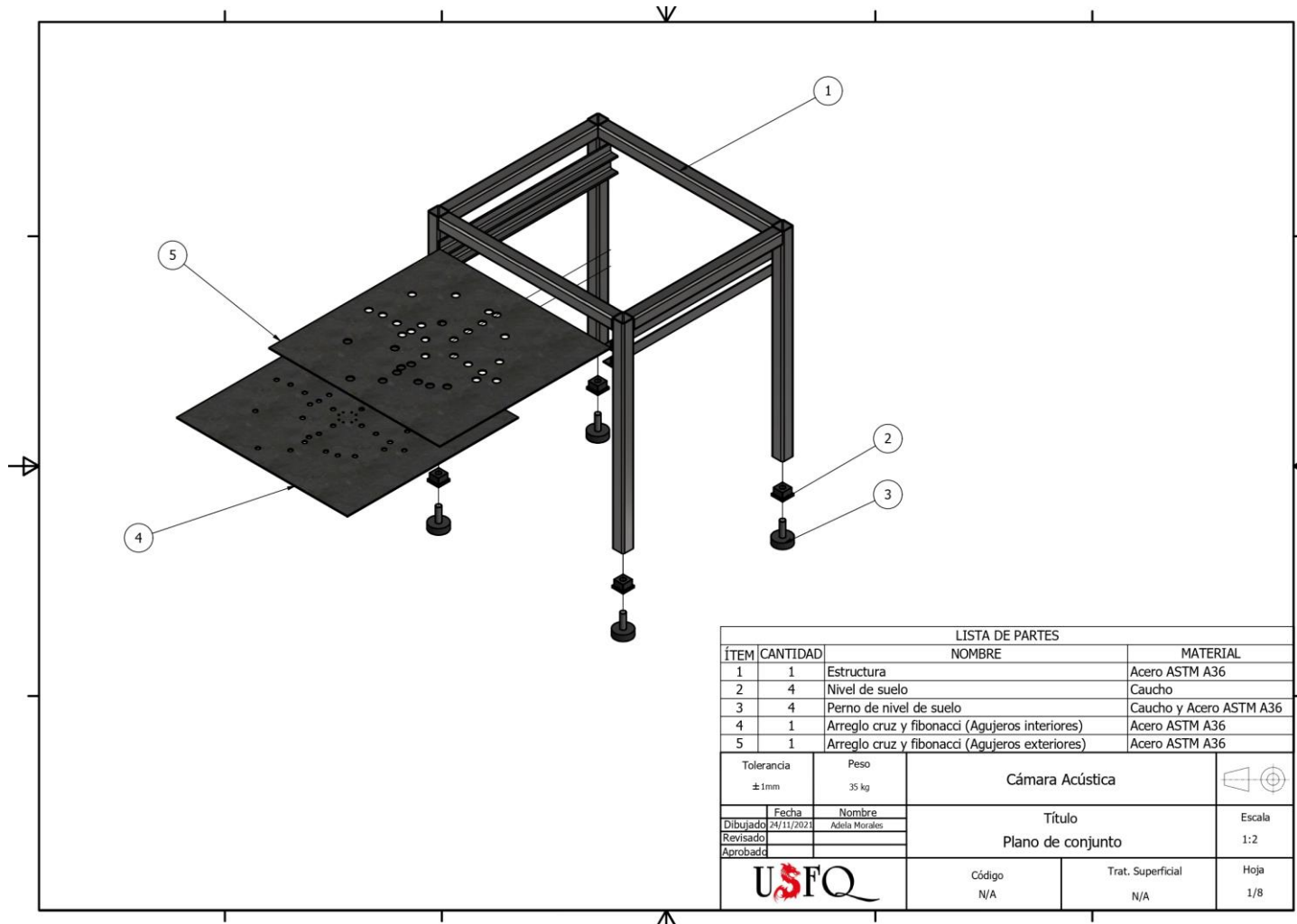
Informe de presupuesto y gastos.

Tabla 40 Resumen de gastos

Descripción	Cantidad	Precio unitario	Valor	Incidencia
Microfonos condensadores ECM8000	16	\$ 53,00	\$ 848,00	6.24%
Cable XLR macho a XLR hembra	16	\$ 11,00	\$ 176,00	1.29%
Puerto XLR macho	16	\$ 3,25	\$ 52,00	0.38%
Cable BNC	16	\$ 7,00	\$ 112,00	0.82%
Puerto BNC	16	\$ 5,00	\$ 80,00	0.59%
Switch tipo clip	16	\$ 0,35	\$ 5,60	0.04%
NI cDAQ 9178	1	\$ 1.700,00	\$ 1.700,00	12.51%
Dataset NI 9234	4	\$ 2.553,00	\$ 10.212,00	75.12%
Webcam	1	\$ 5,00	\$ 5,00	0.04%
Tarjeta madre de Powersupply	2	\$ 10,00	\$ 20,00	0.15%
Programacion tarjeta de Power supply	1	\$ 100,00	\$ 100,00	0.74%
Caja para circuitos	1	\$ 48,00	\$ 48,00	0.35%
Plancha 4x8 2mm	1	\$ 68,95	\$ 68,95	0.51%
Angulo Imp. 30mmx4mm	1	\$ 10,75	\$ 10,75	0.08%
Perfil cuadrado 40mmx3mm	1	\$ 28,12	\$ 28,12	0.21%
Hidrocorte CNC	1	\$ 68,00	\$ 68,00	0.50%
Soldadura estructura	1	\$ 20,00	\$ 20,00	0.15%
Pintura de la estructura	1	\$ 40,00	\$ 40,00	0.29%
		Total	\$ 13.594,42	100%

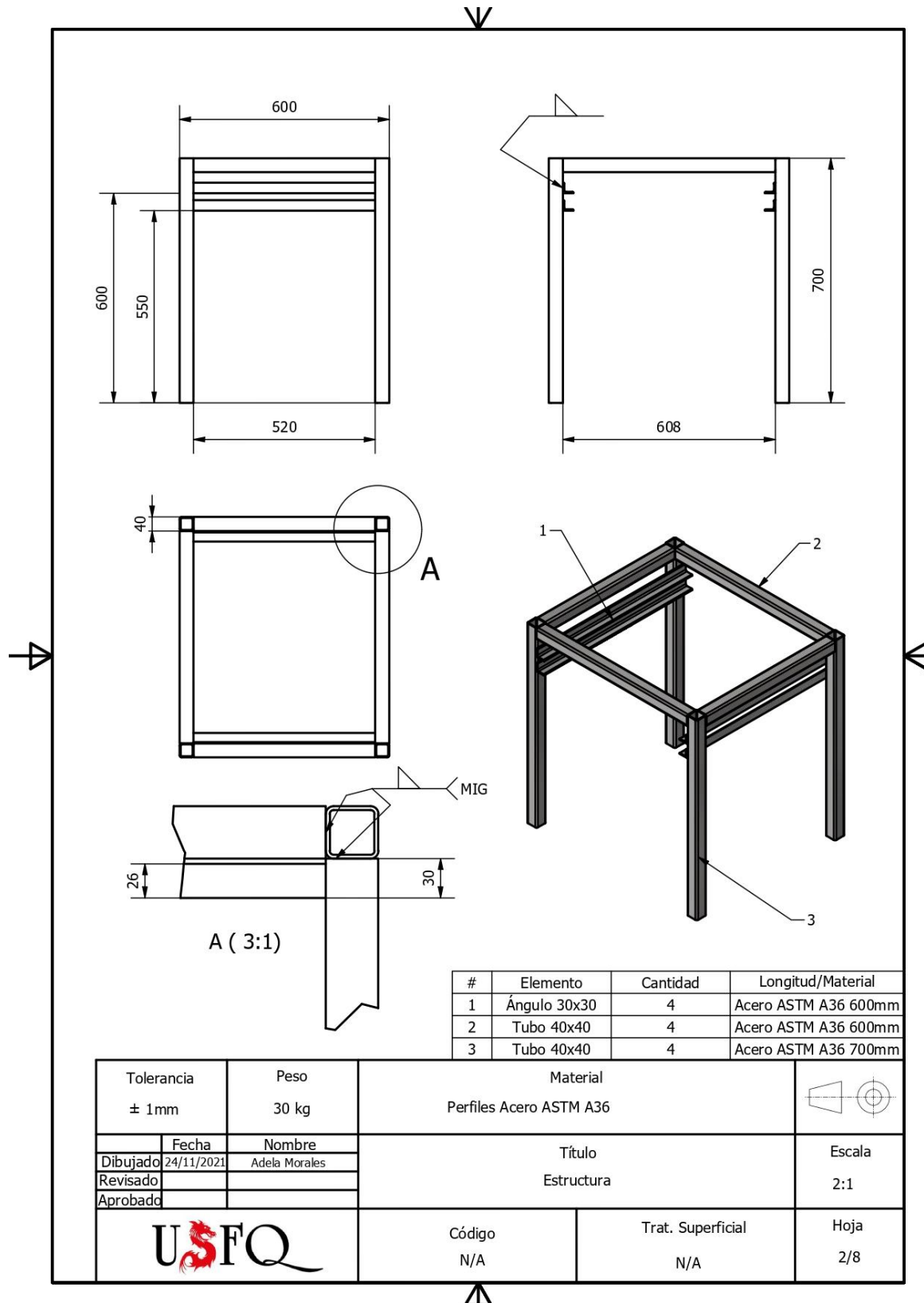
En la tabla 41 se observa que el costo total del proyecto es de \$13594.42 y el presupuesto establecido es de \$300; las celdas resaltadas indican los elementos provistos por el departamento de mecánica de la universidad. De esta forma, el gasto total corresponde a \$383. Se resalta que alrededor del 80% del porcentaje de incidencia corresponde a los micrófonos, dataset NI9234 y el NI cDAQ9178.

ANEXO J: PLANOS



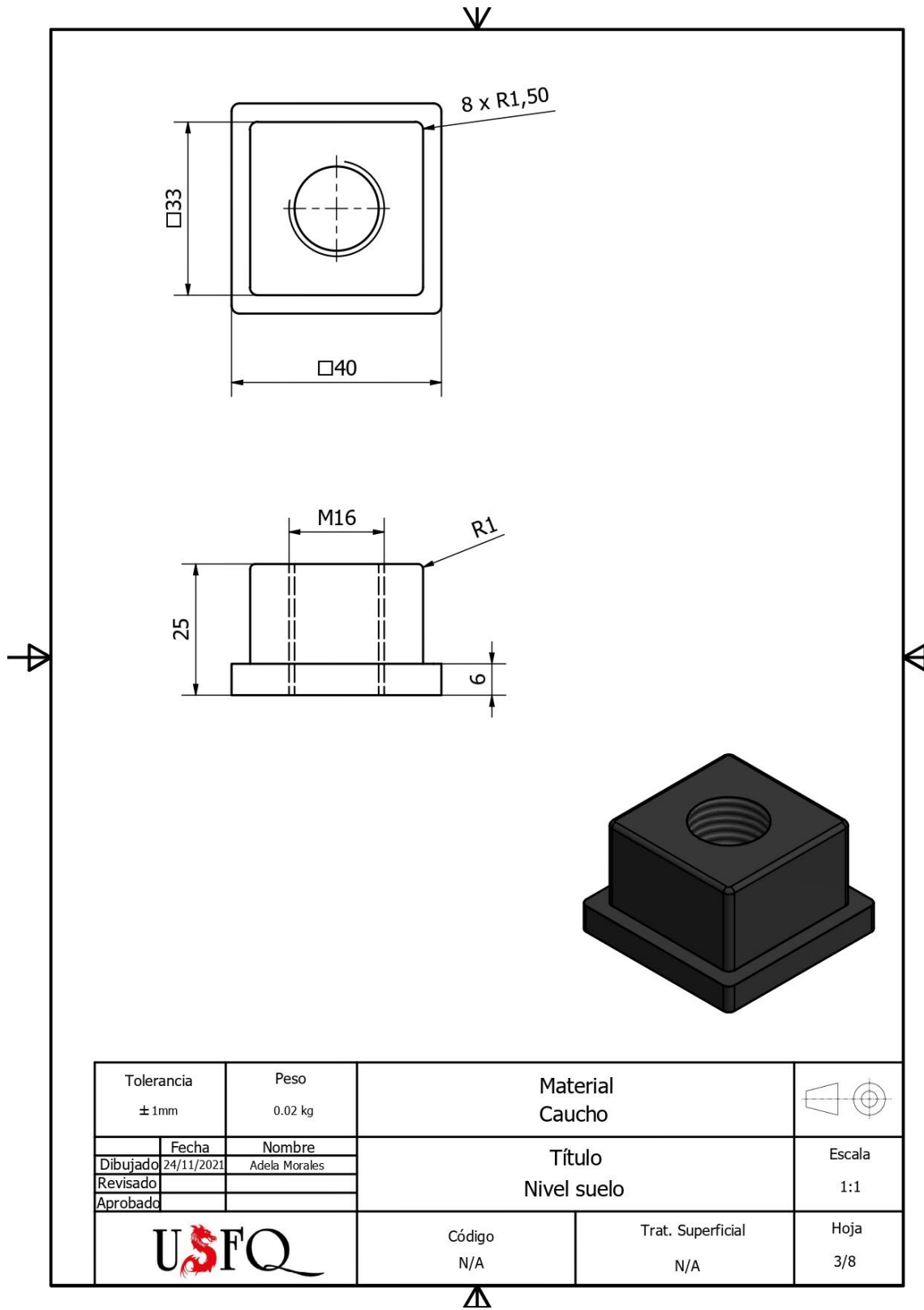
LISTA DE PARTES			
ÍTEM	CANTIDAD	NOMBRE	MATERIAL
1	1	Estructura	Acero ASTM A36
2	4	Nivel de suelo	Caucho
3	4	Perno de nivel de suelo	Caucho y Acero ASTM A36
4	1	Arreglo cruz y fibonacci (Agujeros interiores)	Acero ASTM A36
5	1	Arreglo cruz y fibonacci (Agujeros exteriores)	Acero ASTM A36

Tolerancia ±1mm	Peso 35 kg	Cámara Acústica	
Fecha	Nombre	Título	
Dibujado 24/11/2021	Adela Morales	Plano de conjunto	
Revisado			Escala 1:2
Aprobado			
		Código N/A	Trat. Superficial N/A
			Hoja 1/8

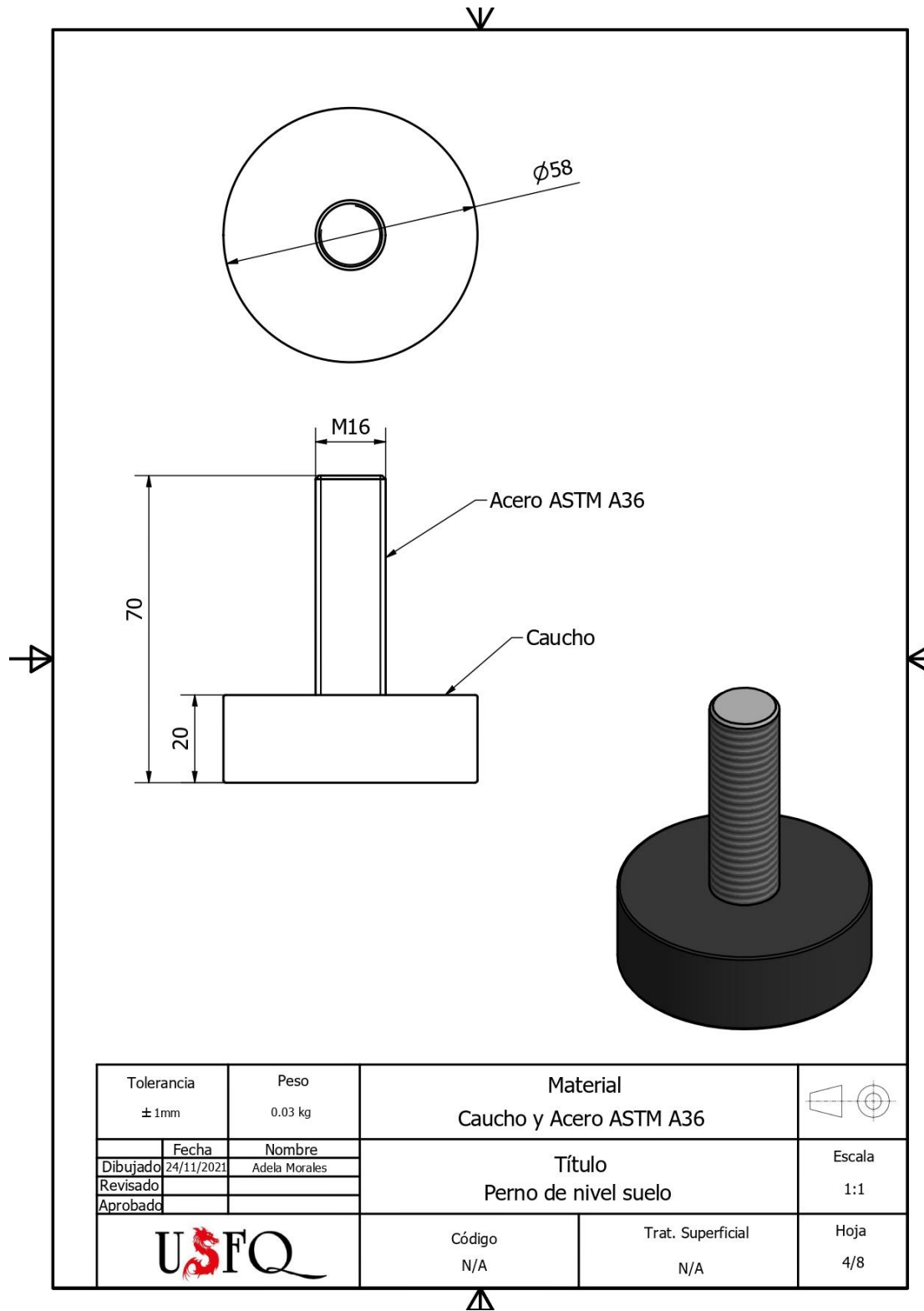


#	Elemento	Cantidad	Longitud/Material
1	Ángulo 30x30	4	Acero ASTM A36 600mm
2	Tubo 40x40	4	Acero ASTM A36 600mm
3	Tubo 40x40	4	Acero ASTM A36 700mm

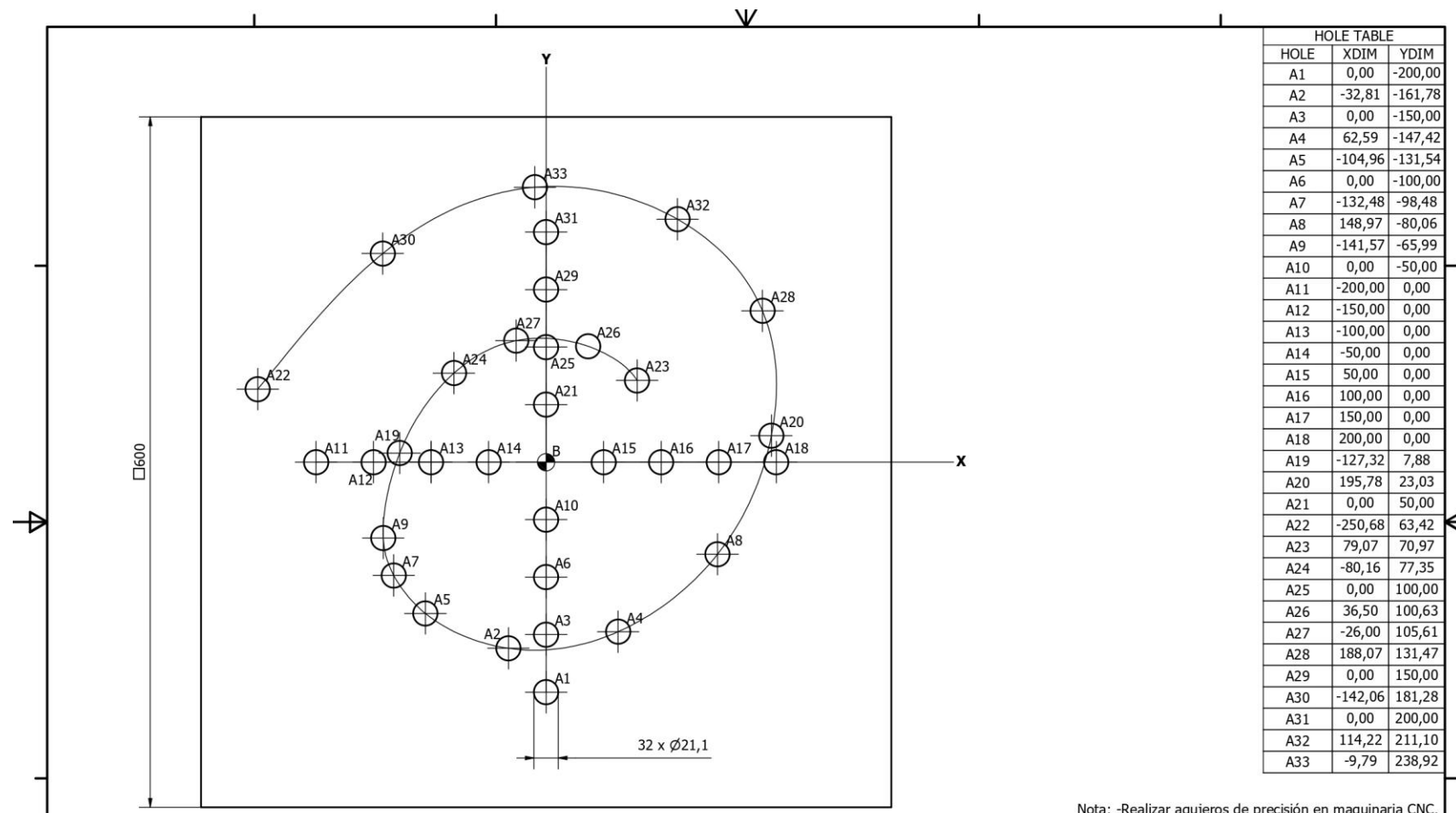
Tolerancia ± 1mm	Peso 30 kg	Material Perfiles Acero ASTM A36	
Dibujado 24/11/2021	Nombre Adela Morales	Título Estructura	Escala 2:1
		Código N/A	Trat. Superficial N/A
			Hoja 2/8



Tolerancia ± 1mm	Peso 0.02 kg	Material Caucho		
Dibujado	Fecha 24/11/2021	Nombre Adela Morales	Título Nivel suelo	
Revisado			Escala 1:1	
Aprobado			Hoja 3/8	
		Código N/A	Trat. Superficial N/A	



Tolerancia ± 1mm		Peso 0.03 kg		Material Caucho y Acero ASTM A36		
Fecha 24/11/2021		Nombre Adela Morales		Título Perno de nivel suelo		Escala 1:1
Dibujado		Revisado				
Aprobado						
		Código N/A		Trat. Superficial N/A		Hoja 4/8

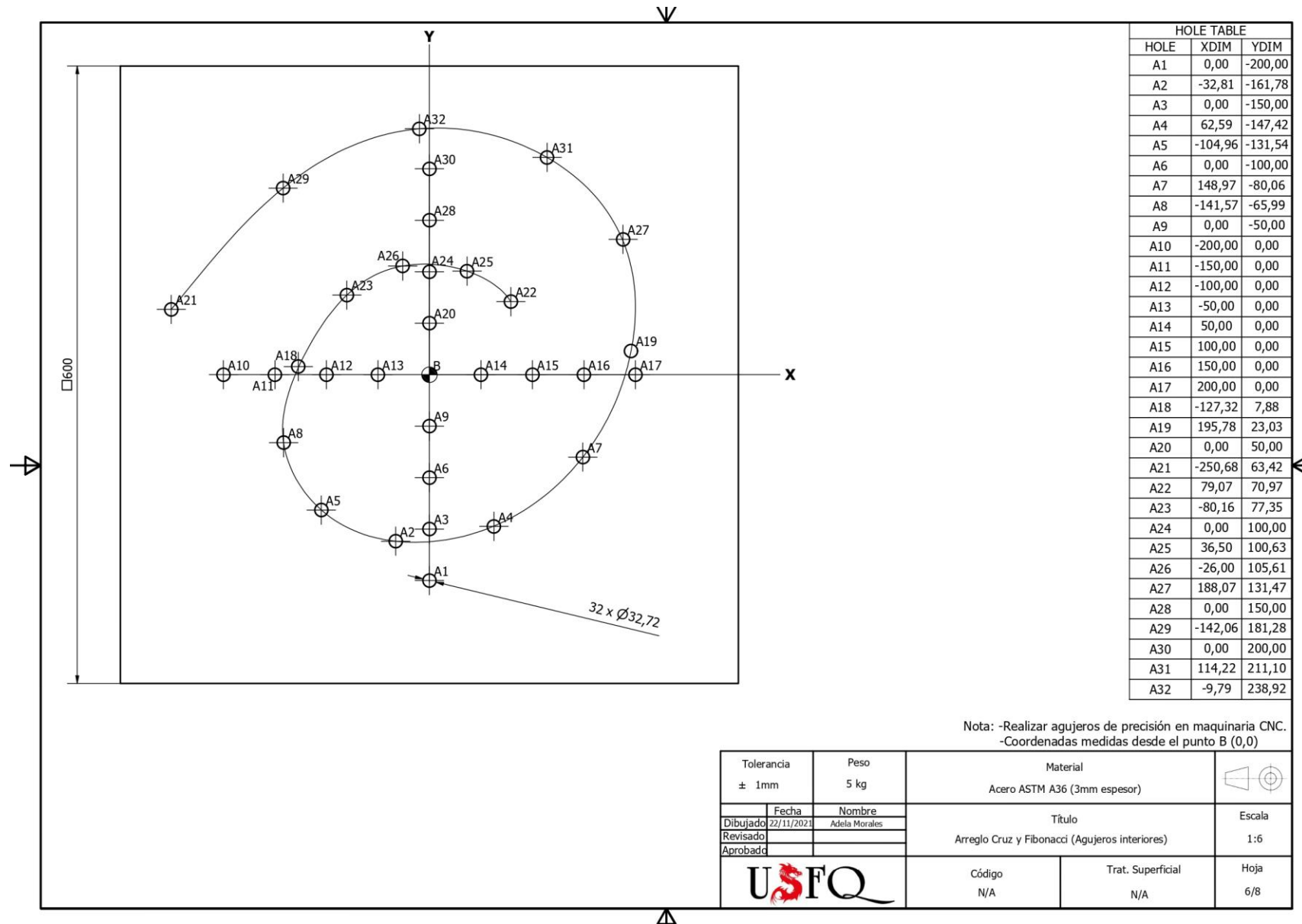


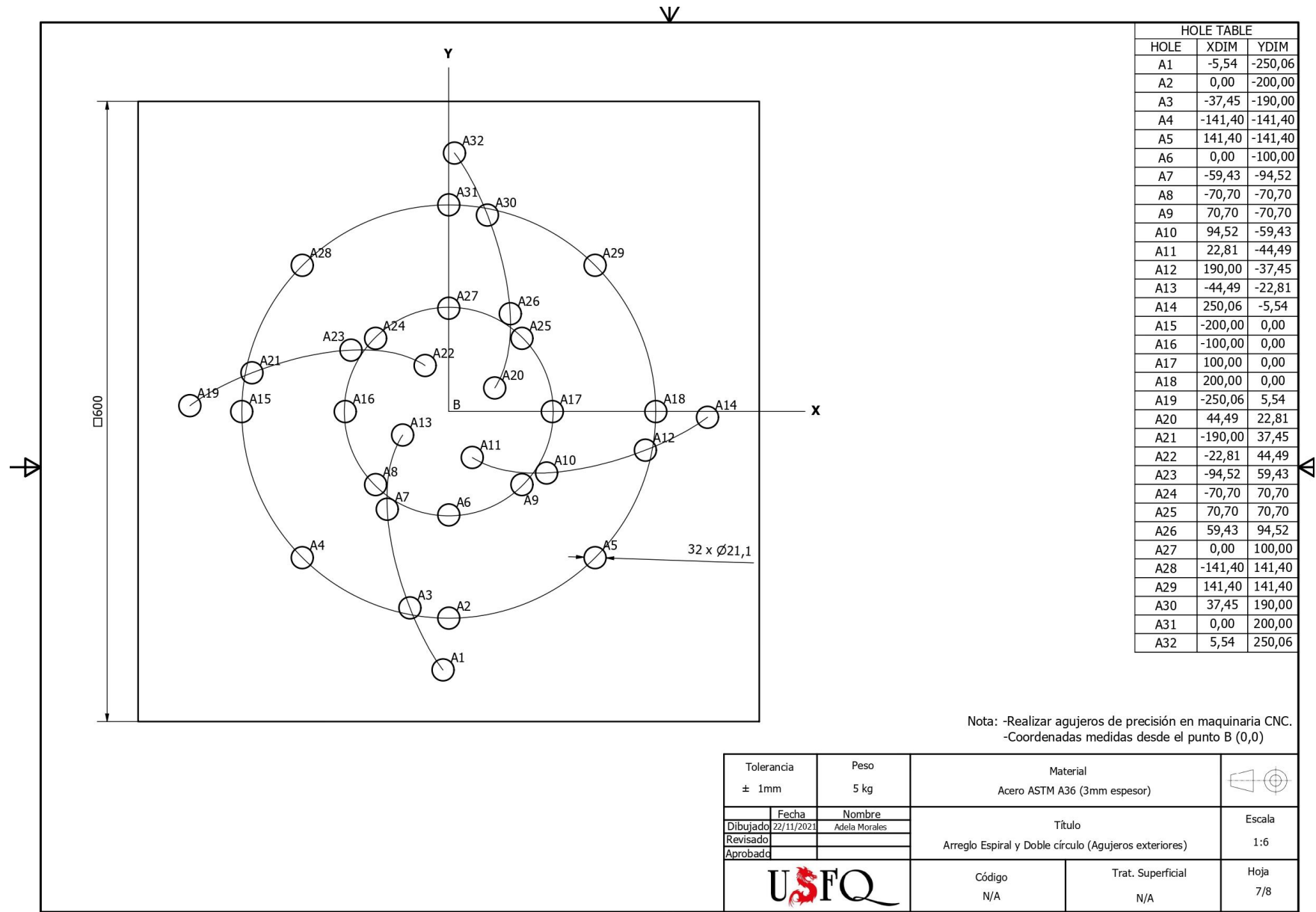
HOLE TABLE		
HOLE	XDIM	YDIM
A1	0,00	-200,00
A2	-32,81	-161,78
A3	0,00	-150,00
A4	62,59	-147,42
A5	-104,96	-131,54
A6	0,00	-100,00
A7	-132,48	-98,48
A8	148,97	-80,06
A9	-141,57	-65,99
A10	0,00	-50,00
A11	-200,00	0,00
A12	-150,00	0,00
A13	-100,00	0,00
A14	-50,00	0,00
A15	50,00	0,00
A16	100,00	0,00
A17	150,00	0,00
A18	200,00	0,00
A19	-127,32	7,88
A20	195,78	23,03
A21	0,00	50,00
A22	-250,68	63,42
A23	79,07	70,97
A24	-80,16	77,35
A25	0,00	100,00
A26	36,50	100,63
A27	-26,00	105,61
A28	188,07	131,47
A29	0,00	150,00
A30	-142,06	181,28
A31	0,00	200,00
A32	114,22	211,10
A33	-9,79	238,92

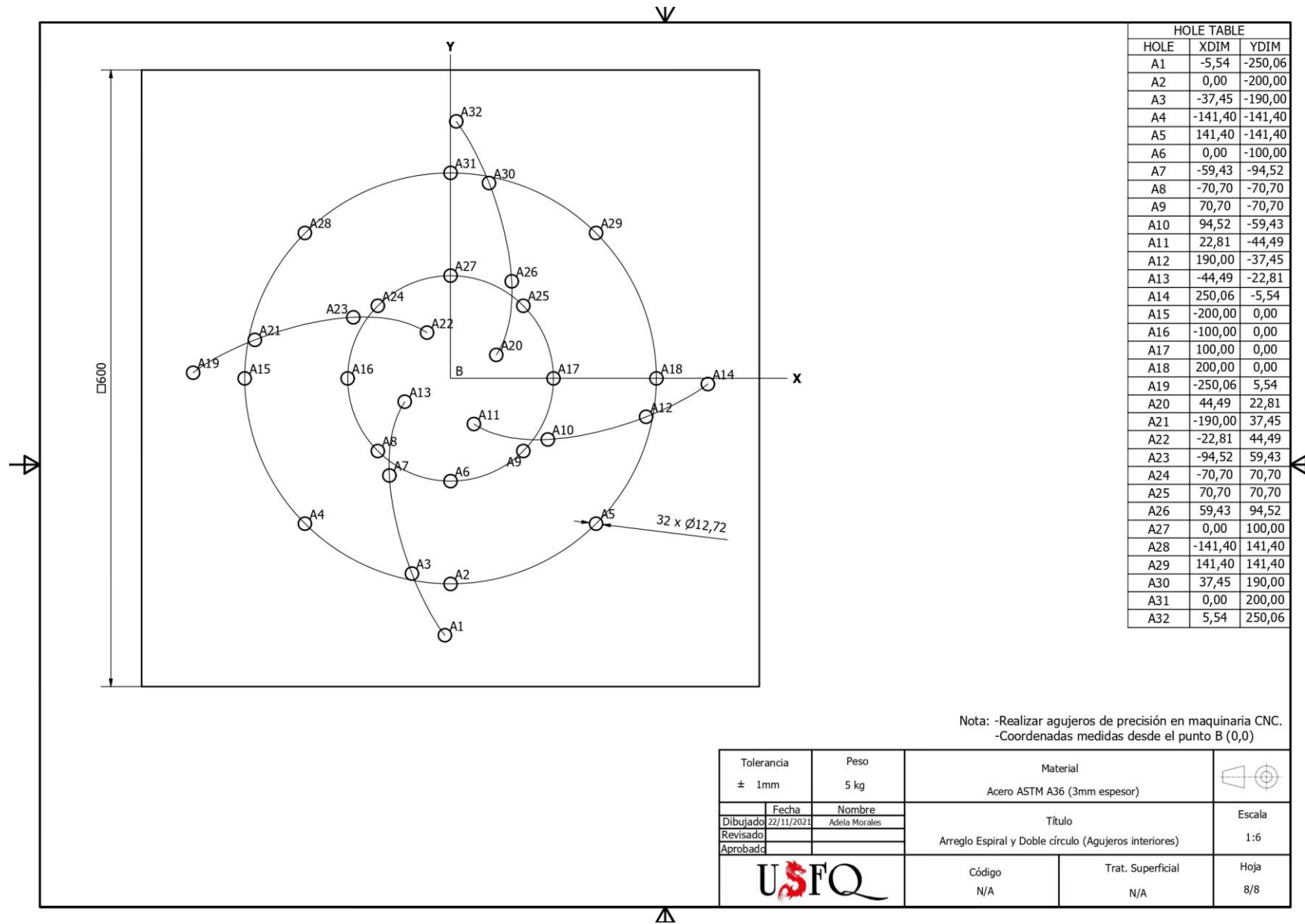
Nota: -Realizar agujeros de precisión en maquinaria CNC.
 -Coordenadas medidas desde el punto B (0,0)

Tolerancia ± 1mm	Peso 5 kg	Material Acero ASTM A36 (3mm espesor)		
Dibujado 22/11/2021	Nombre Adela Morales	Título Arreglo Cruz y Fibonacci (Agujeros exteriores)		Escala 1:6
Revisado		Código N/A		Hoja 5/8
Aprobado		Trat. Superficial N/A		









Nota: -Realizar agujeros de precisión en maquinaria CNC.
 -Coordenadas medidas desde el punto B (0,0)

Tolerancia ± 1mm	Peso 5 kg	Material Acero ASTM A36 (3mm espesor)		
Dibujado 22/11/2024	Nombre Adela Morales	Título Arreglo Espiral y Doble círculo (Agujeros interiores)		Escala 1:6
Revisado		Código N/A	Trat. Superficial N/A	Hoja 8/8
Aprobado				



